

## 摘 要

随着现代汽车制造业、航空航天工业及其他行业的快速发展，市场对弯管件的需求日益增加，并且对精度的要求也越来越高。传统的手工加工以及低精度的机械加工已无法满足现实需求。数控弯管机是数控技术与传统弯管工艺相结合，随着机床工业的发展而出现的。其自动化程度高、效率高，适合于快速精确地弯制复杂的空间弯曲件。作为数控弯管机的核心，控制系统的性能优劣对整个设备的精度和效率影响甚大。因此，研究开发先进的数控弯管控制系统具有重大的现实意义。

鉴于目前市场上已有控制系统的不足，本文首次提出以嵌入式运动控制器为核心，来开发一套功能强、性能稳定、体积小、价格合适的数控弯管控制系统，是在传统运动控制系统基础上的重要创新。

文章首先对多种传统弯管工艺和弯管新工艺以及国内外数控弯管机的发展状况进行了归纳和总结。分析了各弯管工艺特点，确定研究开发适用于单模有芯绕弯管机的控制系统。并根据数控绕弯管机的结构组成及其工作原理等，提出控制要求。对目前常见基于单片机、PLC 等数控弯管机控制系统进行了深入研究，分析其结构组成和功能特点，指出其不足。结合当前数控系统的发展趋势，确定以具有开放性的嵌入式运动控制器为核心开发控制系统的方案，并分别对硬件系统和软件系统进行总体设计。

根据硬件系统总体设计，结合弯管加工的运动特点及控制系统功能需求，选择合适的元器件构建硬件系统，并采取了必要的抗干扰措施。

最后基于 Windows XP 操作系统，利用 VC++6.0 开发了基于单文档的软件系统，基本实现了文件管理、系统设置、数控编程及译码自动加工等功能。整个系统工作稳定，抗干扰能力强，操作方便，具有较高的软硬件开放性，可扩展性好，可靠性高。

**关键词：**数控弯管机，嵌入式运动控制器，伺服控制系统，运动控制

## ABSTRACT

With the rapid development of modern automobile manufacturing industry, aviation and space industry and other industries, the market's demand for pipe pieces and the requirements of higher precision is increasing. Traditional manual processing and low-precision machining has been unable to meet the practical needs. CNC tube bending machine is a combination of CNC technology and traditional pipe bending technic, which emerged with the development of machine tool industry. It has great higher degree of automation and higher efficiency, and is very suitable for fast and accurate bending of complex space curved parts. As the core of CNC pipe bending machine, the performance of control system has a significant impact to the accuracy and efficiency of the whole equipment. Therefore, research and development of advanced tube bending control system is of a great practical significance.

Given the shortages of control system existing in the current markets, to develop a kind of CNC bending control system having stronger function, more stable performance, smaller size and lower price with an embedded motion controller as the core is proposed in this paper for the first time, which is an important innovation based on the the traditional motion control system.

A variety of traditional and new bending technologies, the development status of CNC pipe bending machine at home and abroad are firstly summarized in this article. The characteristics of each pipe bending technic are analyzed to determine doing research and development on the control system suitable for single-die rotary draw bending machine with mandrel. Control requirements are proposed according to the composition and structure of CNC rotary draw bending machine and its working principles. The current common tube bending machine control systems based on SCM or PLC are deeply investigated, and their composition and functional characteristics analyzed, disadvantages pointed out. Considering the current development trend of CNC control system, the proposal to develop a control system with open embedded motion controller as the core was made, and both of the hardware system and software system are overall designed.

According to the hardware system design, and combined with the motion characteristics of pipe processing and functional requirements to control system, appropriate components are selected to build the hardware system, some necessary anti-interference measures are taken.

Finally, the relative software system has been developed based on Windows XP operating system, using VC++6.0 and SDI, which realizes file management, system settings, and CNC automatic machining by code programming and decoding and so on. The entire system is stable, of great anti-interference ability, easy to use, has excellent openness both in hardware and software, and has great extensibility and high reliability.

**Keywords:** CNC tube bending machine, embedded motion controller, servo control system, motion control

## 学位论文版权使用授权书

本学位论文作者完全了解学校有关保留、使用学位论文的规定,同意学校保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子版,允许论文被查阅和借阅。本人授权江苏大学可以将本学位论文的全部内容或部分内容编入有关数据库进行检索,可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存和汇编本学位论文。

保 密  , 在            年解密后适用本授权书。

本学位论文属于

不保密  。

学位论文作者签名: 唐学峰      指导教师签名: 殷苏民

2010年6月8日

2010年6月8日

## 独创性声明

本人郑重声明：所呈交的学位论文，是本人在导师的指导下，独立进行研究工作所取得的成果。除文中已注明引用的内容以外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的作品成果。对本文的研究做出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本人完全意识到本声明的法律结果由本人承担。

学位论文作者签名：唐雪峰

日期：2010年6月8日

## 第一章 绪论

塑性加工技术能够使材料实现成形和改性，在材料加工工程中占有重要地位。在国际市场竞争、知识经济和绿色制造兴起的新态势下，塑性加工技术既面临严峻挑战又充满机遇。面向 21 世纪，迫切需要发展先进塑性加工技术，使塑性加工产品朝着轻量化、高强度、高精度、高效、低消耗以及数字化和智能化的方向发展<sup>[1]</sup>。

以管材为毛坯，通过塑性加工手段，制造管材零件的工艺方法称为管材塑性加工<sup>[2]</sup>。管材塑性加工比较容易满足产品轻量化、强韧化和精确制造等方面的要求。此外管类结构由于具有强度高、刚度好等力学性能和节省材料以及外形美观等实用特点<sup>[3]</sup>，使其在现代航空航天工业、汽车工业、船舶制造业、中央空调制造业和石油化工等多种行业中得到了广泛的应用。

管材弯曲成形是管塑性成形技术的重要组成部分。采用管材弯曲加工管件，除了常用钢、铜、铝管外，也使用各种合金及其他金属管作为管坯<sup>[4]</sup>。用管材制造的弯曲零件，无论是平面弯曲件，还是空间弯曲件，除了大量应用于气体、液体的输送管路，在金属结构中的应用也十分广泛。因此管材弯曲成形是备受关注并得到迅速发展的重要领域<sup>[5]</sup>。接下来介绍管材弯曲成形的几种方法。

### 1.1 管材弯曲成形技术分类

管材弯曲成形的的方法很多。按弯曲成形方式可以分为滚弯、压弯、推弯和绕弯；按弯曲时是否使用模具可以分为有模弯和无模弯；按弯曲时有无芯棒可以分为有芯弯和无芯弯；按弯曲时是否加热可以分为冷弯和热弯<sup>[6]</sup>。近年来还出现了零半径弯曲、中频感应弯曲、热应力弯曲和激光成形弯曲等新的弯管工艺。

#### 1.1.1 传统弯管工艺<sup>[6][7]</sup>

##### 1) 滚弯

滚弯是用三个辊轮对管材进行弯曲加工的方法。其工作原理如图 1.1 所示，其中辊轮 3 为主动轮，其余两个为从动轮。滚弯方法及工作原理与板材滚弯基本

相同，只是管材滚弯所用的辊轮具有与管坯横截面形状相吻合的工作表面。弯曲时只需改变主、从辊轮间的间隔，就可以实现各种曲率半径的弯曲。这种方法尤其适合弯制环形或螺旋线形管件。不过，滚弯对弯曲半径有一定的要求，仅适用于曲率半径较大的厚壁管件，对于小半径弯曲显得无能为力。

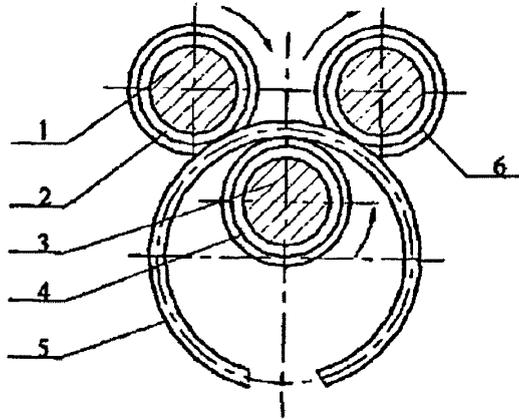


图 1.1 滚弯原理图<sup>[7]</sup>

1—轴 2, 4, 6—辊轮 3—主动轴 5—管材

Fig 1.1 Elementary diagram of tube roll-bending

1—axis 2,4,6—roller 3—driving axis 5—tube

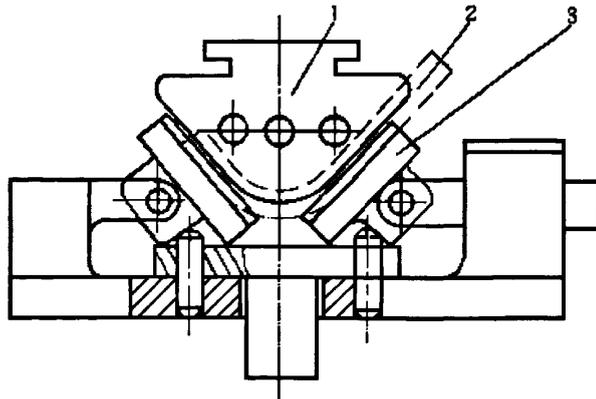


图 1.2 V形管件压弯模<sup>[7]</sup>

1—凸模 2—管坯 3—摆动凹模

Fig1.2 V-shape tube bending die set

1—punch 2—tube 3—wobbly plate

## 2) 压弯

压弯是最早用于管材弯曲加工的工艺方法，如图 1.2 所示。它是在液压机上利用模具对管坯进行弯曲加工的。压弯具有模具调整简单、生产效率高等优点，故在生产中一直被广泛应用，一般用于弯制带直段的管件或弯头等。

### 3) 推弯

推弯是管材弯曲加工中较为常见的弯管方法。根据推弯工艺特点，又可分为型模式冷推弯管和芯棒式热推弯管两种。在一般压力机、液压机或专用推制机上进行弯曲加工，主要用于弯制弯头。

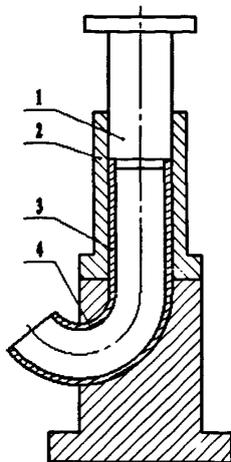


图 1.3 型模式冷推弯管装置

1—压柱 2—导向柱 3—管坯 4—弯曲型模

Fig1.3 Moulding of cold-push tube bending

1—press pillar 2—orient sleeve 3—tube 4—bending mould

型模式冷推弯管（如图 1.3 所示）是在普通液压机或曲柄压力机上借助弯管装置对管坯进行推弯加工的工艺方法，即利用金属的塑性，在常温下将直管坯压入带有弯曲型腔的型模中，从而形成管弯头。

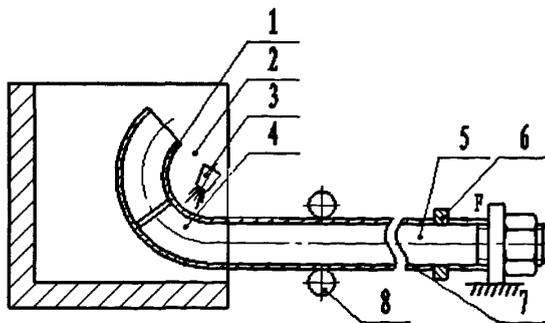


图 1.4 芯棒式热推弯管工作原理图

1—弯头 2—反射加热炉 3—热源 4—牛角芯棒

5—芯杆 6—推板 7—管坯 8—支撑板

Fig1.4 Elementary diagram of hot-push tube bending with mandrel

1—bend 2—reflective heating stove 3—heating source 4—horn mandrel bar

5—mandrel 6—pushing blank 7—tube 8—supporting blank

芯棒式热推弯管（如图 1.4 所示）是在专用推制机上，在轴向推力下通过牛角芯棒，边加热边推制，使管坯产生周向扩张和轴向弯曲变形，从而将较小直径的管坯推制成较大直径的弯头。

#### 4) 绕弯

绕弯是最常用的弯管方法，按弯管设备的不同又可以分为手工绕弯和弯管机绕弯两类。手工绕弯由于不需要专用的弯管设备，弯管装置简单、制造成本低、调节使用方便，但劳动强度大、生产率低，主要应用于小批量生产的场合。而弯管机绕弯根据其有无芯棒又可以分为有芯弯管和无芯弯管。

有芯弯管的工作原理如图 1.5 所示。其中弯曲模 1 是固定在主轴上的，随着主轴一起运动；5 为芯棒，放置在管件 4 内部；6 为防皱模。弯曲时，首先夹紧模 2 把管件 4 夹紧在弯曲模 1 上；接着压力模 3 压紧管件，使其紧贴弯曲模和防皱模，并在弯管过程中不会产生侧向运动。随着弯曲模的转动，最终管件绕着弯曲模旋转而成形。

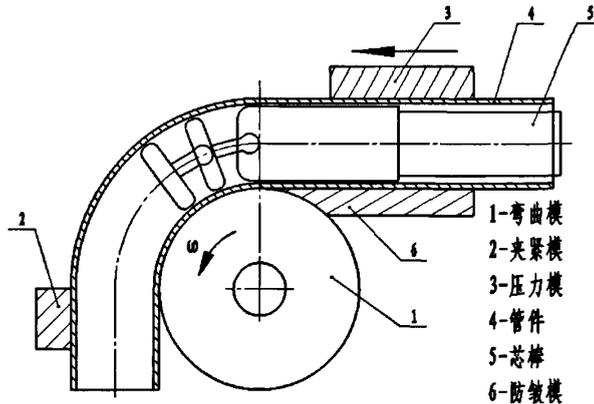


图 1.5 拉拔式绕弯原理图

Fig1.5 Elementary diagram of rotary draw bending

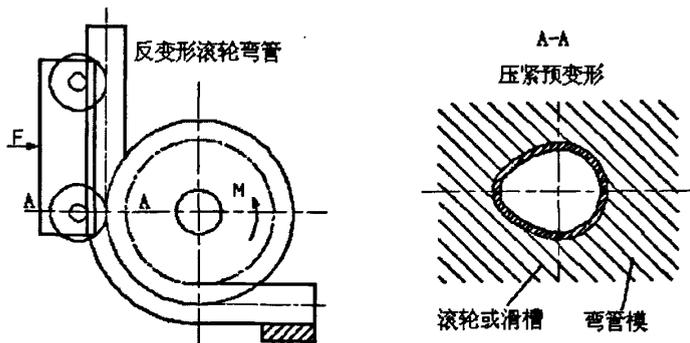


图 1.6 无芯反变形弯管

Fig1.6 Tube bending using prestrain method but without mandrel

无芯弯管的工作原理与有芯弯曲相似，其原理如图 1.6 所示。由于其省略了芯棒，为了对弯曲回弹进行补偿，一般在管坯进入弯曲变形之前要进行反变形处理。即利用反变形滚轮或滑槽对管坯施以适当的压紧预变形。在弯曲后，相反方向的变形相互抵消，使管材横截面基本能够保持圆形。

### 1.1.2 弯管新工艺

#### 1) 自由弯曲

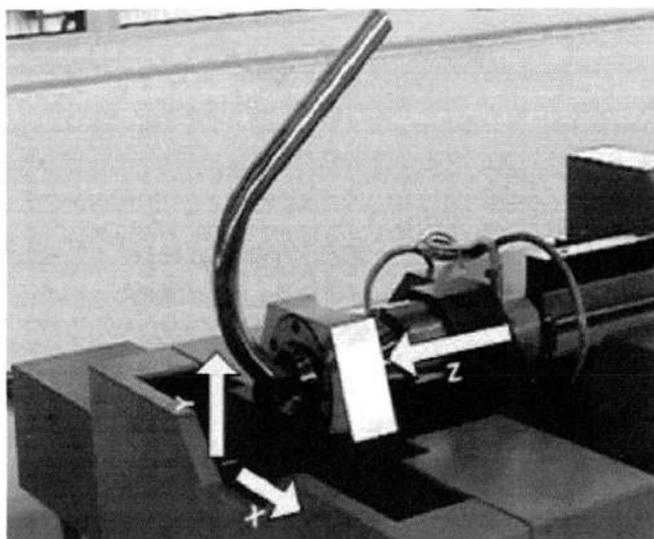


图 1.7 Nissan CNC 自由弯曲弯管机<sup>[8]</sup>

Fig1.7 Nissan CNC bender for free-bending

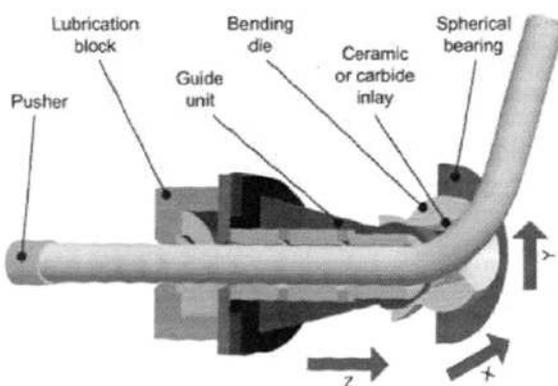


图 1.8 自由弯曲原理图<sup>[8]</sup>

Fig1.8 Schematic diagram of free-bending

文献[8]介绍了一种叫做自由弯曲的弯管新工艺（实物图 1.7 所示），主要应用于汽车行业。其结构原理如图 1.8 所示，弯曲主要由 Z 方向的进给通过导向模

和弯曲模完成，而弯曲模通过一个球轴承和导向模是相连的。弯管时，只需通过交流伺服电机改变球轴承的 X、Y 轴方向即可。

自由弯曲具有许多优点，如具有快速的弯曲速度、即使在只有很少过渡量的多个弯或螺旋形弯曲的情况下也不需重新装夹管件即可完全按照自定义弯曲几何形状而成形等。而且其特别适合弯曲型材和管材，这使自由弯曲更加适用于汽车零部件的制造。

### 2) 零半径弯曲<sup>[9]</sup>

在制造空调装置、热水装置等的热交换器时，由于配管空间的限制，希望钢管的弯曲半径愈小愈好。近几年，利用弯曲加工与液压相结合的方法成功地开发出了弯曲半径为零的钢管弯曲加工技术。如图 1.9 所示，模具由上下模组成，在上下模内插入钢管，管内施加内压  $P$ ，上下模具在推力  $W$  的作用下相对移动，使钢管产生零半径弯曲。为了防止弯曲变形时产生局部断裂，在钢管的两端施加压力  $F$ 。选择适宜的内压力  $P$ 、压力  $F$  和模具移动力  $W$ ，有利于减少钢管弯曲成形过程中产生缺陷的可能性，从而得到成形优质的弯管。

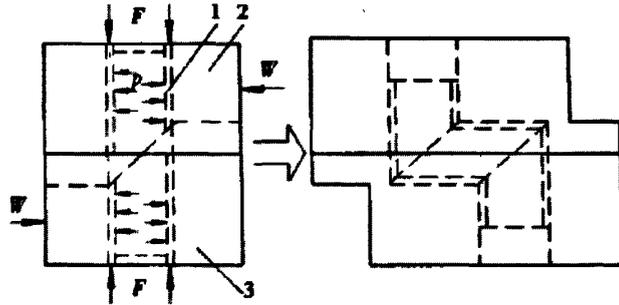


图 1.9 零半径弯曲原理图<sup>[9]</sup>

1-管坯 2-上模 3-下模

Fig1.9 Diagram of Zero radius bending

1-tube 2-upper die 3-lower die

### 3) 中频感应热弯曲

中频感应局部加热弯管工艺是当今国际公认的大直径厚壁管材弯管加工中最先进的工艺方法。如图 1.10 所示，它是一种采用电磁感应局部加热钢管，用喷水或喷冷风的方法控制适当的热变形区，并用导辊支承导向，由旋转的曲臂夹住管子前端部，推动管子后端使之弯曲成形的方法<sup>[10]</sup>。

这一新工艺具有弯管质量高，外形美观，弯曲半径准确且适用范围广，工艺装备简单，生产率高和经济效益显著等优点。已广泛应用于电站、化工等设备中

大型管道的加工。华北电力大学研制开发的机电液一体化 ZW 系列大型中频弯管机是我国目前最先进的中频弯管设备。

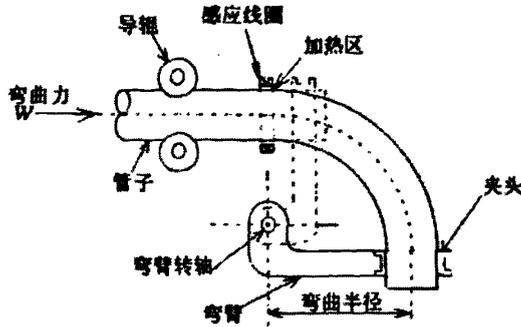


图 1.10 中频感应弯管示意图<sup>[10]</sup>

Fig1.10 Outline of tube bending using induction heating

#### 4) 热应力弯曲

热应力弯曲是一种利用工件内部温度分布不均匀所产生的热应力来驱动工件变形的特殊的成形方法，具有无外力、无模具、便于现场操作等优点。通常产生热应力的方法是对工件进行局部加热或冷却。加热方式包括火焰局部加热和加热炉内整体加热；冷却方式包括空冷、喷水冷却及浸水冷却<sup>[11]</sup>。具体采用哪种方法，应根据实际加工条件及工件特征选择。

北京机电研究所曾对管的热应力弯曲进行了相关研究，设计出一种炉内整体加热后浸水冷却的方案，能够获得较好的弯曲效果。它是先将管子整体加热到一定的高温，然后以一定速度水平浸入水中（如图 1.11 所示）。管件完全冷却后，最终凹向后入水的一侧。

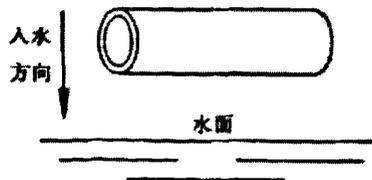


图 1.11 热应力弯管

Fig1.11 Thermal stress tube bending

#### 5) 激光成形弯管

激光成形是一种利用激光束照射材料表面时形成的内部非均匀热应力场来实现材料成形的新技术<sup>[12]</sup>。其弯曲成形的基本原理可概括如下：经激光扫描在材料的受热区形成很大的不均匀温度场，而周围冷态材料的约束使该温度场所诱

发的热应力大大超过了随温度变化的屈服极限,从而产生压缩塑性变形,最终当材料冷却后形成了残余应力和弯曲变形。激光弯曲成形的机理有温度梯度机理(TGM)、镦粗机理(UM)和压曲机理(BM)<sup>[13]</sup>。不同的机理有不同的适用范围和条件。管材的激光弯曲成形主要是利用 UM 成形机理。

与其他弯管工艺相比,激光弯曲成形是一种非接触式、不需外力的无模成形技术,工艺更加灵活。激光弯曲成形具有成形精度高、生产周期短、柔性大等特点,适合于小批量零件生产,可成形各类异构件、高硬度和脆性材料,如钛镍合金、陶瓷、铸铁等<sup>[14]</sup>。但这种方法的设备投入成本高,对操作人员的技能要求也比较高。由于激光成形研究起步较晚、加之加工成本高,目前还没有大量应用该技术的报道。

## 1.2 国内外数控弯管机的发展概况

装备制造业是一个国家和地区工业化水平与经济科技总体实力的标志,是国家经济安全和军事安全的重要保障。而数控技术当属现代装备制造业的核心,主要应用在数控机床上。由于国家对装备制造业的高度重视,经过多年的发展,我国已经成为装备制造业大国,但整体水平仍有待提高。

数控机床按其功能大致可以分为金属成形类机床(如弯管机、折弯机、剪边机和冲压机床等)、金属切削类加工机床(如车、铣、刨、磨、镗等机床)和特种加工类机床(如电火花加工机床、激光切割机床、线切割机床、水切割机床等)。其中,金属成形类弯管机的起步相对较晚,且为非标准机械。由于弯管的需求多样化,工艺、外形等具体要求也千差万别。因而至今国内外开发的各类型数控弯管机一般只能按照特定的工艺过程来满足特定的加工需求,通用性比较差。

我国弯管机研发起于 90 年代初,且以液压弯管机为主。目前张家港南丰镇及其附近村镇,为国内最大的弯管机生产制造基地,聚集了合丰、联丰、台和、蓝田、友胜、平方等百来家弯管机制造厂及其零配件厂。其中,大部分弯管机制造商还是以制造、销售液压弯管机为主。只有极少数厂家能够提供某一两种型号的数控弯管机,从而导致了国内市场上存在着数控弯管机品牌杂而少的局面。

而国外的弯管机制造商如美国的 Eaton Leonard、HMT、Miic,英国的 Addison McKee, UNISON 和意大利的 BLM 等,他们都早已开发出成系列的数控弯管机,

并占据了大部分国际市场。他们开发的数控弯管系统专用性强，关键零部件也都基本是自己公司配套生产的，所以价格昂贵。一般中、高档数控弯管机单价在200万人民币以上。

### 1.3 课题的来源、目的及研究意义

随着社会的发展，各行业对管材弯曲件的需求迅速增长。尤其是汽车、家电等行业，对各种不同类型弯曲件的需求日益增长并对精度、效率提出了更高的要求。而目前的实际情况是，一方面国内生产的弯管机主要定位于中低端机型，难以满足高精度、高效率的加工需求，导致高端弯管机几乎完全依赖进口；另一方面从国防安全看，发达国家把包括部分弯管机在内的高精尖数控产品都列为国家的战略物资，对我国实行禁运和限制，“东芝事件”和“考克斯报告”就是最好的例证。这严重影响了我国相关产业的长远发展<sup>[15]</sup>。

因此，为满足广阔的市场需求、降低经济成本，研究开发国产高档数控弯管机具有重大战略意义，将有助于提升我国装备制造业的水平、加速我国经济发展，使我国早日实现工业化。

本课题即是在这样的背景下，与张家港某弯管机制造厂家合作，旨在开发先进的数控弯管机而展开的。我们主要负责数控系统部分的研究和开发。

在充分分析管材成形技术及加工工艺的基础上，鉴于绕弯工艺为最常用的弯管方法且具有以下特点<sup>[16]</sup>：

- (1) 弯管机结构简单，弯管时所需的工艺装备少，动力装置需要的功率较低；
- (2) 弯管的质量比较好，壁厚减薄率和椭圆率都较小；
- (3) 可以实现较短管件 $0^{\circ}\sim 180^{\circ}$ 范围内弯角的弯曲，能满足连续弯曲；
- (4) 投资少，设备费用、加工费用都较低，生产效率高，经济效益显著。

所以我们将管材绕弯的加工方法和开放式数控系统相结合进行研究开发。

### 1.4 论文的主要内容

论文主要归纳如下：

- 1、对多种传统弯管工艺和弯管新工艺以及国内外数控弯管机的发展状况进

行了归纳和总结，分析各弯管工艺特点；

2、详细介绍了数控弯管机的结构组成及其工作原理，并据此初步提出对控制系统的要求；

3、对目前常见基于单片机、PLC 等数控弯管机控制系统进行深入研究，分析其结构组成和功能特点，指出其不足。根据对目标系统的控制要求，提出合理的控制方案，并分别对硬件系统和软件系统进行总体设计；

4、根据硬件系统总体设计，结合弯管加工的运动特点及控制系统功能需求，为系统选择合适的元器件，构建硬件系统，并采取必要的抗干扰措施；

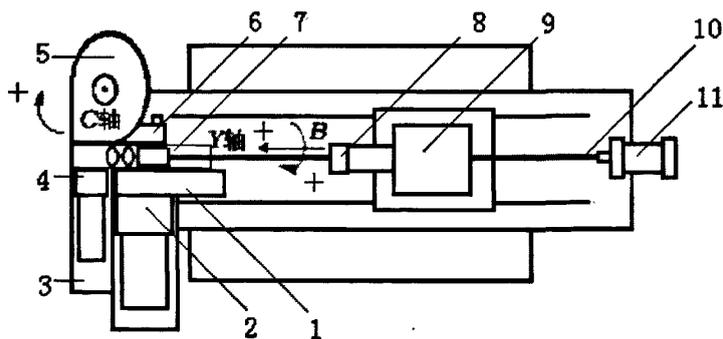
5、根据软件系统总体设计，选择合适的软件平台和开发工具，实现软件系统各功能的开发。详细介绍了各功能模块的实现方法，并给出了部分关键代码。

## 第二章 数控弯管机的工作原理及控制要求

传统绕弯工艺多是手工绕弯，效率低，质量难以保证。随着机床工业的发展，将现代数控技术与传统弯管工艺相结合而产生的数控弯管机，由于可以方便地调节加工工艺参数，因此可以快速、准确、稳定地完成弯曲、送进、转角等动作，大大地提高了生产效率，保证了弯管质量。数控弯管机自动化程度高，适合于快速精确制造包括复杂空间弯曲件在内的弯管零件。结合相应的数据库软件系统，控制程序还可以修正、补偿弯曲回弹。本文所研究开发的控制系统就是针对最常用的有芯绕弯工艺的。

### 2.1 数控弯管机结构组成及绕弯工作原理

#### 2.1.1 数控弯管机结构组成



1-随动模；2-导向模；3-弯臂；4-钳口；5-弯曲模；6-防皱模；7-管材；8-夹头；9-小车；10-芯棒；11尾座。

图 2.1 弯管机结构简图<sup>[17]</sup>

Fig2.1 Structural diagram of rotary drawing bender

弯管机的结构如图 2.1 所示：其中弯曲模 5 安装在弯曲轴上，用于加工不同直径和弯曲半径的管材；弯臂 3 与弯曲轴相连，用于对管件进行弯曲（C 轴）；钳口 4 安装在弯臂 3 上，用于将管材 7 夹紧在弯曲模 5 上，随着弯曲模一起旋转而将管材弯曲成形；导向模 2 带动随动模 1 而压紧管材 7，使之在弯管时不会发展侧向运动，同时与弯臂 3 配合，共同提供管材发生塑性变形所需的扭矩；弯曲时随动模 1 跟随管材向前移动；防皱模 6 安装在弯曲模一侧，用于防止管材在弯

曲过程中发生褶皱；夹头 8 与运送小车相连，用于夹住管材 7 并能够转动使管材 7 绕 Y 轴转动；小车 9 在 Y 轴方向运动，用于送进管材 7；芯棒 10 插入管材 7 内部，防止弯管时出现起皱、扁平、变薄等失效；尾座 11 用于夹持芯棒和调整高度，可以实现进芯、退芯的动作。

按功能组合，可将上述各部件划分为夹紧弯曲装置、送料转角装置以及芯棒调整装置等三大部分。整个系统由机械系统、电气控制系统以及液压系统等组成，以实现管材直线送进、旋转弯曲、空间转角以及弯管各辅助动作的精确控制。

### 2.1.2 绕弯工作原理

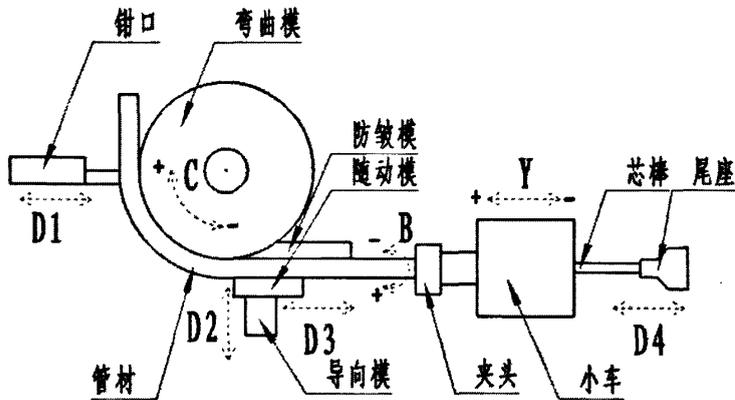


图 2.2 数控弯管机绕弯工作原理示意图

Fig2.2 Work principle of rotary drawing CNC bender

数控弯管机绕弯是指将管材夹紧在弯曲模上随弯曲轴一起转动，使管材受拉伸发生不可恢复的塑性变形而成形的一种弯管工艺，属于成形模弯曲的一种。如图 2.2 所示，导向模压紧管材后，钳口将管材紧紧夹靠在弯曲模上，随着弯曲模转动，管材在钳口、导向模、随动模和弯曲模的共同作用下形成以弯曲模半径为半径的圆弧状；弯曲到一定角度后，钳口松开随着弯臂回到原位，导向模带动随动模离开，随动模恢复原状；接着小车上的夹头带动管材空间旋转一定角度并移动到下一弯曲位置准备下一弯。由于弯曲半径由弯曲模的半径决定。若想得到不同的弯曲半径，只需替换不同半径的弯曲模具即可。

具体的弯管过程可表述如下：

- 1) 小车运动到程序设定的上料位置，夹头松开；
- 2) 上料，夹头夹紧；

- 3) 小车运送管材到第一弯曲位置;
- 4) 芯棒进到位, 即图 2.1 中芯棒前端与弯曲模相切的位置;
- 5) 导向模进使能, 通过随动模将管件压紧于防皱模上;
- 6) 钳口使能, 夹紧管件;
- 7) 夹头松开, 助推模助推使能;
- 8) 连接弯曲轴的弯臂与弯曲模旋转, 带动钳口拉伸管材;
- 9) 弯曲到一定角度后, 夹头使能, 夹紧管材;
- 10) 钳口松开;
- 11) 弯臂回原位, 芯棒退到位;
- 12) 导向模退使能, 随动模复位使能;
- 13) 小车运动到下一弯曲位置, 若无下一弯, 则结束, 否则继续;
- 14) 夹头带动管件作一定角度的空间旋转;
- 15) 转到第 4 步;

## 2.2 数控弯管机的控制要求

根据前述的绕弯原理和弯管机结构(单模)可知, 机床有三个主要运动轴: Y 轴—小车带动管材的直线送进运动轴; B 轴—小车上的夹头带动管材的空间旋转轴; C 轴—弯曲模的弯管旋转轴。除了三个主要运动轴外, 还有一些弯管必要的辅助动作: 夹头的夹紧、放松, 钳口沿 D1 方向的夹紧、放松, 导向模沿 D2 方向的压紧、退压, 随动模沿 D3 方向的随动、恢复以及尾座沿着 D4 方向的进芯、退芯。

结合实际需要并保证弯管质量、提高加工效率, 弯管控制需要满足以下要求:

- 1) 能够对弯曲、送料、转角三个主要运动进行快速、准确、稳定的位置和速度控制;
- 2) 能够对夹头、钳口、导向模、随动模、芯棒等进行合理的逻辑控制;
- 3) 具有人机交互功能, 可以方便地输入、修改工艺参数和实时地显示加工动态、出错报警等信息;
- 4) 具有多种控制方式, 可以实现手动调整和自动加工;
- 5) 系统稳定、具有开放性, 易于扩展、升级和维护;

根据目前数控弯管机行业推荐标准数控系统应保证 0.1 毫米或 0.1 度的最小设定量<sup>[18]</sup>，即送料精度要达到 $\pm 0.1$  毫米，而弯曲及转角精度要达到 $\pm 0.1$  度。

### 2.3 本章小结

本章首先详细介绍了弯管机的结构组成和绕弯工作原理，在此基础上分析、初步提出了弯管机的动作控制要求，结合行业推荐标准，目前要达到 0.1 毫米或 0.1 度的最小设定量，并指出控制系统应具有开放性、易于升级和维护。

## 第三章 数控弯管机控制系统的研究

随着计算机技术和自动控制技术的不断发展，数控系统也不断更新。到目前为止，在数控弯管机中主要出现了基于 Z-80 单板机的控制系统、基于单片机的控制系统、基于 PLC（可编程逻辑控制器）的控制系统和基于 IPC 的控制系统。目前，基于 PC 的开放式数控已成为国内外数控系统的主要发展方向<sup>[19]</sup>。

### 3.1 常见的数控弯管机控制系统

基于 Z-80 单板机的控制系统早已过时，现在常见的主要有基于单片机、PLC、IPC 等三种数控弯管机控制系统，下面将分别予以介绍。

#### 3.1.1 基于单片机的控制系统

文献[20]介绍了一种基于 8751 单片机弯管机控制系统，并着重介绍了单片机在弯管角度控制方面的应用。该系统中，主控单元为一个 8751 单片机。弯管时，单片机既要实现数码显示、三轴电机驱动控制和多个辅助动作开关量等大量输出信息的控制，同时还要对由 8255 并口输入的控制键操作响应和采集的光电编码器信号进行计算处理等。单从文中的介绍的角度控制就可见其程序复杂度非同一般。文献[21]介绍了一种基于 8031 单片机的数控弯管机控制系统，弯曲精度可以达到 $\pm 1$ 度。根据文中介绍系统需要控制包括夹紧、芯棒推进、弯曲、芯棒回退、放松和转臂等六个单步动作<sup>[21]</sup>，并没有空间转角，可知该系统为简单的平面弯管控制系统。

这种基于单片机开发的控制系统速度较慢，精度不高。同时由于单片机的软硬件资源有限、开放性差，导致其人机交互性不友好，难以实现工艺参数修改，加工动态、故障警告信息显示等，实际操作也比较麻烦。另外恶劣的工作环境对其稳定性也有很大的影响。其唯一的优点是相对成本较低。因此，一般只用来开发低档的、工艺过程相对简单的经济型控制系统。现在市场上只有极少数经济型数控弯管机使用这种系统。

### 3.1.2 基于 PLC 的控制系统

文献[22]介绍了一种采用施奈德 PLC 对平面弯管机进行数字化改造的方法。文献[23]介绍了一种基于三菱 FX1S2-30MT PLC 和步进电机的弯管控制系统。该系统采用开环控制,送料误差 0.5 毫米,步进电机步距角为 0.9 度,减速机的减速比 1/15,理论上角度精度可以达到 0.06 度。其中,两个步进电机被用来控制左、右弯各为 180 度的弯曲。

这两种都为特殊弯管工艺,这里不作详细介绍。另外更为常见的是基于带有运动控制功能的 PLC 或者基于 PLC 和定位模块开发的三维弯管控制系统。

文献[24]介绍的便是一种采用上述后者形式的弯管控制系统设计方法。这是目前国内市场上数控弯管机广泛采用的控制系统。系统主要由三菱 Q 系列 PLC、位置/速度控制模块 QD75M4、触摸屏 F970GOT 以及交流伺服单元等组成。使用 SFC 和梯形图结合的方式编程实现 PLC 时序控制。由于采用了触摸屏,该系统人机交互性与基于单片机的控制系统相对而言有所提高。触摸屏界面设计有产品数据、XYZ 加工数据、YBC 加工数据、操作设定、手动调试、单步运行、自动运行、输入/输出状态显示、报警记录显示等界面,方便操作。

总的来说,基于 PLC 的控制系统结构简单、操作方便、实时性好、抗干扰能力强,适合于半自动弯管加工。由于硬件资源的限制,PLC 的插补算法通常都采用逐点比较法,插补精度不高。因此对精度和自动化程度要求较高的复杂的三维空间弯管难以用其实现。

### 3.1.3 基于 IPC 的控制系统

为了弥补单纯的基于单片机或基于 PLC 控制系统的不足,文献[25]、[26]介绍了在一种采用集散控制模式的数控弯管机控制系统。该系统采用数字电液闭环控制,直线送料轴和空间转角轴均采用电机位置闭环控制,弯曲轴采用液压位置闭环控制。这三个主要运动轴分别由三个基于 80C196K 单片机开发的智能控制模块控制,其他控制量由 PLC 控制。智能控制模块和 PLC 均作为下位机,上位机为一台 386 工业控制计算机,工控机通过 IO 扩展将 PLC 内置并通过 RS-232 串口与智能控制模块通信。上位机主要用来实现监控、过程显示,协调动作和向下位机发送控制命令。

该系统能够实现三维弯管控制，但硬件成本太高，且既要开发基于单片机的智能控制模块又要进行 PLC 编程，并通过工控机协调两者的动作过程，系统开发周期长。

文献[27]则介绍了另一种适用于转台式拉弯的集散式计算机弯管控制系统。上位机为一台 ADVANTECH610 工业控制计算机，下位机为欧姆龙公司 CQM1H 和 CS1G PLC 组成，CQM1H 用于模拟量控制及高速计数，CS1G 用于开关量控制。同样存在硬件成本高，系统不具有开放性。

上述两种方式虽然都不适合目前弯管机发展的需求，但是值得我们借鉴的地方是其采用的上、下位机的控制模式。这样即能够充分利用工控机丰富的软硬件资源、又能够实现运动控制功能。

## 3.2 基于 PC 的开放式数控

### 3.2.1 开放式数控<sup>[28][29]</sup>

由于计算机硬件的标准化和模块化，以及软件模块化、开放化技术的日益成熟，目前，数控系统正在由传统的专用、封闭控制模式向通用、开放的控制模式变革发展。开放式数控具有模块化、标准化、可再次开发、平台无关性、适应网络操作方式的特点，有更好的通用性、柔性、适应性和扩展性，已经成为新一代 CNC 的发展方向。

多年来，国际上有关开放式数控的研究项目较多，但是最具影响力的仍是“三 O 计划”，即美国的 OMAC 计划、欧盟的 OSACA 计划和日本的 OSEC 计划。这三个计划的进展基本上代表了国际先进开放式数控的发展现状。

(1)OMAC (Open Modular Architecture Controllers)计划是美国通用、福特和克莱斯勒三大汽车公司于 1994 年启动的，旨在发挥美国在计算机科学方面的领先优势以降低控制系统的投资成本和维护费用、缩短产品开发周期、提高机床利用率。OMAC 并没有提供固定的基础体系结构，也没有指定硬件平台及操作系统，而是提供一种具有软硬件平台无关性的“即插即用”和高效的控制器重构机制。OMAC 通过对通用控制器按类分解抽象得到基类，然后用一系列功能相关的基类通过标准化接口组成“即插即用”控制模块，最后根据需要选择相关的控制模

块组成完整的数控系统。其中，“即插即用”控制模块，可以被重复利用或继承。不同控制系统通过选择不同的模块来实现。OMAC 采用了与面向对象软件开发过程相似的“搭积木”的思想来构造控制系统，提高了系统的重用性。

(2)OSACA(Open System Architecture for Controllers with Automation Systems) 计划是 1990 年由欧共体 22 家控制器开发商、机床生产商、控制系统集成商和科研机构联合发起的。OSACA 借鉴了 ISO 的 OSI 参考模型，通过对现有控制系统的详细分析，提出了“分层的系统平台+结构功能单元”结构。OSACA 认为一个开放式控制系统应该以一个系统平台为基础，由一组逻辑上离散的功能部件组成，控制系统本身不带有平台的任何信息；在平台之间定义了很好的接口，允许不同的供应商提供的组件之间可以协调工作；控制器可以运行在不同的系统平台上。

(3)OSEC (Open System Environment for Controller)计划是 1994 年由东芝机器厂、丰田机器厂、Mazak 公司三家机床制造商和日本 IBM、三菱电子及 SML 信息系统公司等 6 家日本公司联合提出的。其目的是建立一个国际性的工厂自动化(FA)控制设备标准。OSEC 以日本国际机器人和工厂自动化研究中心(IRO FA)所提出的 CNC 系统参考模型为基础，提出了一个开放体系结构。其“PC+适配器卡”的方案，可以充分利用 PC 机的价格、资源、技术优势、方便灵活，能满足用户对制造系统不同配置的要求、最小化费用要求和应用先进控制算法及基于 PC 的标准化人机界面的要求。

以上三个计划分别提出了三种不同的标准化开放体系结构，但迄今为止在世界范围内还没有形成统一标准的软硬件平台以及用户界面。

“八五”期间，我国广大科研工作者也成功开发了两种数控平台和华中 I 型、蓝天 I 型、航天 I 型、中华 I 型等 4 种采用模块化，嵌入式的软、硬件结构的基本系统。这些控制系统各有优点，其中以华中 I 型较具代表性。它采用工业 PC 机上插接口卡的结构，运行在 DOS 平台上，具有较好的模块化、层次化特征，具有一定扩展和伸缩性。但它们还不具备开放性控制系统的本质特征，仍有许多改进之处。

我国在开放式数控方面的技术与国际先进水平还存在一定的差距。为此，我国在 2000 年也开始进行中国的 ONC 系统 (Open numerical control system) 的规范框架的研究和制定。

### 3.2.2 PC-CNC 开放式数控

随着 PC 机技术迅速发展, 性价比不断提高, 各系统制造商纷纷研究基于 PC 的数控系统, 并有大量产品推出。目前, 基于 PC 机的开放式数控已成为数控市场上的主流产品。

从实现结构上来看, 目前 PC-CNC 开放式数控系统主要有以下三种类型<sup>[30]</sup>:

#### 1) 全软件型

全软件型开放式数控, 是一种基于微机平台, 采用实时操作系统, 开发具有各种运动控制功能的软件控制器, 并结合伺服卡实现运动控制的数控系统。额外的硬件仅是计算机与伺服驱动和外部 I/O 之间的标准化通用接口。这是一种全开放系统, 提供给用户最大的灵活性。用户可以在 WINDOWS 平台和其他操作系统的支持下, 利用开放的运动控制内核, 根据功能需要开发各种高性能运动控制系统。

全软件型数控的特点是开发、制造成本相对较低, 能够给予系统集成商和开发商更加个性化的开发平台。典型的全软件式运动控制器有: 美国 MDSI 公司的 Open CNC、Soft SERVO 公司的基于网络的运动控制器、德国 PA (Power Automation) 公司的 PA8000NT 和固高科技 (深圳) 有限公司的 GO 系列运动控制器等。

#### 2) “PC+运动控制卡”

“PC+运动控制卡”开放式数控是一种把带有计算机标准总线 (ISA、PCI) 接口的运动控制卡插入到 PC 中, 基于 PC 及开放的函数库开发的数控系统。其中, PC 机作为人机界面和网络通信, 完成数控加工过程中实时性要求较低的任务; 运动控制卡则负责实时性要求较高的运动控制等。运动控制卡大都采用 DSP 或微机芯片作为 CPU, 可完成运动规划、高速实时插补、伺服滤波控制和伺服驱动、外部 I/O 之间的标准化通用接口功能。用户可以根据不同的需求, 在 DOS 或 WINDOWS 等平台下自行开发各种控制系统。如美国 Delta Tau 公司的 PMAC 多轴运动控制卡和固高科技 (深圳) 有限公司的 GE、GT 等系列运动控制卡。

文献[31]介绍了一种基于固高 GE-300-SG-PCI 运动控制卡, 在 Windows 2000 操作系统平台下, 采用 Visual Basic 6.0 作为开发工具, 开发快速点磨削成形机开放式数控系统的成功案例。

这种采用“PC机+运动控制卡”的开放式数控系统，具有信息处理能力强、开放程度高、运动轨迹控制精确、通用性好、系统开发周期较短等优点。用户可以根据需求，迅速、高效、低成本地构建个性化的控制系统。同时由于PC机有丰富的软硬件资源可以利用，且便于操作、维护和更新换代<sup>[32]</sup>。目前基于“PC+运动控制卡”的开放式数控已经成为数控系统发展的重要方向。

### 3) 嵌入式

嵌入式数控，是一种基于嵌入式运动控制器开发的数控系统。这种运动控制器是把计算机嵌入到运动控制器中的一种产品，能够独立运行，是PC技术与运动控制技术相结合的产物，实质上是上述运动控制卡的一种变种。运动控制器与计算机之间依然是靠标准的计算机总线通信，但是通信模块采用了更加可靠的印制电路板总线连接或针式连接器总线连接方式（板卡结构的运动控制器采用金手指连接），更加适合工业应用。在使用中，该控制器可采用如工业以太网、RS485、PROFIBUS等现场网络通信接口联接上级计算机或控制面板等，也可配置软盘和硬盘驱动器。这类产品有美国ADEPT公司的SmartController，德国西门子的SINUMERIK 840Di以及固高科技公司的GU、GUC嵌入式运动控制系列产品等。

由于嵌入式运动控制平台具有标准PC的接口功能，用户不需再购买工业PC就能很方便的组成系统，并且不加任何改动就可以很方便地将在PC上开发的应用系统移植过来。这种嵌入式运动控制器提高了整个系统的可靠性，并使系统更加简洁和高度集成化。

随着SOM（system on module）和SOC（system on chip）技术的快速发展，目前嵌入式运动控制器已可用于工业控制。因此从产业化生产的角度来看，嵌入式运动控制器具有较高的应用价值。

## 3.3 控制系统总体方案

通过上述对各数控弯管机控制系统的分析可知：基于单片机的控制系统成本较低，仅能满足一般弯管需求，存在系统速度慢、精度低、稳定性差、人机交互不友好、开放性差等缺点，且系统开发周期较长；基于PLC的控制系统虽然在系统稳定性、人机交互方便有所改善，但是仍然不能满足对高效率、高质量的弯管需求，同样存在开放性差不易于系统升级的缺点；而基于单片机或PLC的集

散控制虽然在人机交互上有所改善,却大大增加了硬件成本,并且在开放性方面并无改观。

文献[33]采用华中世纪星数控系统开发弯管机专用数控系统,系统不具有开放性,且增加了成本,这种方法不适合一般新系统的开发;文献[34]、[35]则均介绍了基于“PC+运动控制卡”的模式来开发弯管控制系统。这种虽然方式虽然也能够满足各项要求,但存在PC资源的严重浪费,且集成度低,不适合工业批量生产。

因此,为了解决以上缺点,即满足精度高、稳定性、实时性和开放性、人机交互友好、开发成本适中等要求。本文结合数控系统的发展趋势,首次采用了以嵌入式运动控制器为核心构建弯管控制系统,并开发相关的数控软件。嵌入式运动控制器可以满足弯管加工技术的严格要求。数控弯管机控制系统整体上可分为硬件系统和软件系统两部分。

### 3.3.1 硬件系统总体设计

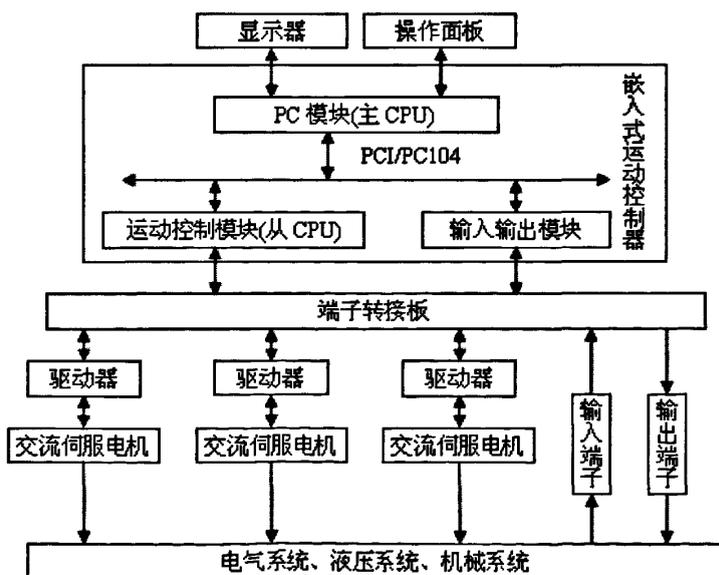


图 3.1 控制系统硬件结构简图

Fig3.1 Hardware structure diagram of control system

弯管控制的硬件系统结构组成如图 3.1 所示,系统以嵌入式运动控制器为核心,以显示器作为人机交互界面,并配以操作面板用于方便操作和信息输入。送料、弯曲、转角等三个主要运动轴均由交流伺服系统进行精确的驱动与控制,其

他辅助动作由液压系统控制。

### 3.3.2 软件系统总体设计

数控弯管机的软件系统结构如图 3.2 所示，按功能需求将其分为文件管理、系统设置、数控加工和系统监控等四大模块，各功能模块又有若干子模块构成。其中加工动态仿真单独作为一期子项目研究，本系统只为其预留开发接口和窗口。整个软件系统可在 Windows XP 操作系统平台上，采用 VC++6.0 IDE 并使用 MFC 以及随运动控制器提供的驱动程序及运动函数库开发实现。

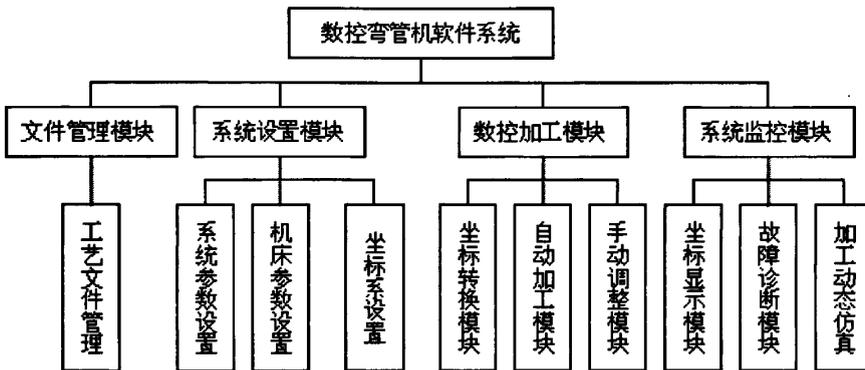


图 3.2 数控弯管机软件系统结构简图

Fig3.2 Software system structure diagram of CNC bender

### 3.4 本章小结

本章仔细分析了几种常见的数控弯管机控制系统的优劣，并指出常见的系统已很难满足现实要求。随后结合当前数控发展的趋势，以及弯管控制的加工精度、效率、系统稳定性及开放性的要求，并考虑实际生产成本等客观情况，提出了以具有开放性的嵌入式运动控制器为核心开发数控弯管机控制系统的方案，并初步设计了软、硬件系统的总体结构。

## 第四章 数控弯管机硬件系统设计

### 4.1 硬件系统结构组成

根据弯管控制要求，本文提出了如图 4.1 所示的硬件系统结构。弯管机控制系统硬件结构的设计主要包括主控系统、交流伺服控制系统、液压控制系统的设计及其组成元器件的选择。主控系统负责各种控制指令的输入和对整个系统的监控、协调。交流伺服控制系统和液压控制系统通过端子板与控制器相连。

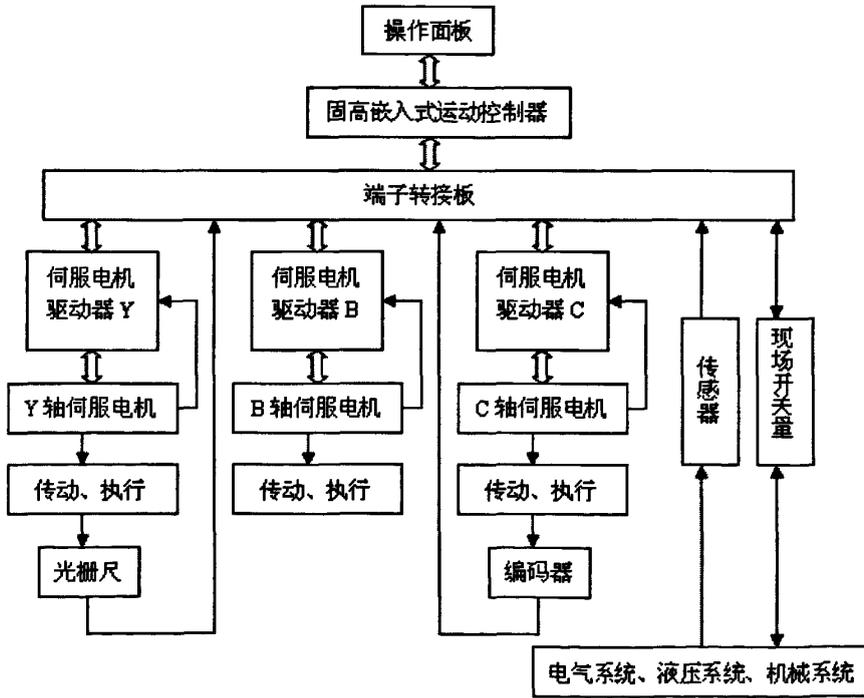


图 4.1 硬件系统结构图

Fig4.1 Structure diagram of hardware system

本系统采用固高嵌入式运动控制器为系统的控制核心。系统其他相关硬件均为固高、欧姆龙、松下等品牌企业的产品，安全可靠，使用寿命长。如同服系统采用日本松下配套的数字式交流伺服驱动器以及交流伺服电机，性能好、质量高。

#### (1) 主控系统

主控系统的控制部件主要包括嵌入式运动控制器，操作面板。前者作为整个系统的“大脑”，负责发送运动控制指令、整个系统的协调，通过调用库函数中

的 I/O 口读写函数即可读入系统所有的输入信号或设置输出信号；后者提供友好的人机交互界面，用于指令代码输入、系统监控以及工作状态显示。

### (2) 交流伺服控制系统

交流伺服控制系统用于驱动控制 Y、B、C 三个轴以实现送料、旋转、弯曲三个动作的精确控制，主要包括三套松下交流伺服、光栅尺、编码器等。YBC 轴均为半闭环或全闭环控制，具有较高的控制精度，能够满足控制系统精度要求。

### (3) 液压控制系统

液压控制系统为一般的开环控制，用来控制夹紧、随动等辅助动作，主要包括液压泵、液压泵电机、电磁阀、液压缸等元器件。系统根据接近开关、限位开关等检测元件，按照一定的逻辑通过电磁阀控制液压缸运动实现辅助动作控制。

## 4.2 基于嵌入式运动控制器的主控系统

### 4.2.1 GUC 嵌入式运动控制器

一个典型的运动控制系统主要由运动控制器、驱动器、传动机构、执行机构、和运动部件构成<sup>[36]</sup>。整个系统的运动指令由运动控制器给出，因此须结合功能需求为系统选择合适的运动控制器。

按运动轨迹可将运动控制分为点位控制、直线控制和轮廓控制三种。点位控制又称为点到点控制，是一种从某一位置不管中间过程的运动轨迹只需精确地移动到目标位置即可。直线控制又称为平行控制，这类运动除了控制点到点的准确位置之外，还要保证两点之间移动的轨迹是一条直线，而且对移动的速度也要进行控制。轮廓控制又称为连续轨迹控制，这类运动能够对两个或两个以上运动坐标的位移及速度进行连续相关的控制，因而可以进行曲线或曲面的运动<sup>[37]</sup>。

弯管控制属于典型的点位控制。为了减少移动部件的运动与定位时间，运动控制器要求具有快速的定位速度，在运动的加速段和减速段，采用不同的加减速控制策略。一般先以快速移动到终点附件，然后以低速准确移动到终点定位位置，以保证良好的定位精度。所以，点位运动控制器往往具有在线可变控制参数和可变加减速曲线的能力。因此控制器须具有点位控制功能。

同时由于弯管工作现场条件相对恶劣，最常见的问题是电气干扰，震动、冲

击大。因此，控制器必须同时满足以下要求：可靠性高，适应工业现场恶劣、复杂的工作环境；实时处理能力强，满足工业生产过程实时控制需求；具有丰富的可与工业生产现场信号相连的工业接口；具有开放性结构，系统易于扩展。

固高 GUC 系列嵌入式运动控制器，以 Intel Celeron M 系列 CPU 及 Intel 852GM 系列芯片组为系统处理器，采用高性能 DSP 和 FPGA 作为运动控制协处理器，处理器之间通过 PCI 总线通信。它既可实现高性能多轴协调运动控制和高速度点位运动控制，又可实现普通 PC 机的所有基本功能。

本系统选用固高 GUC-400-TSV-ML-M01-L2 通用型嵌入式运动控制器，其外形如图 4.2 所示。该控制器具有如下功能<sup>[38]</sup>：

- ◆ 点位控制，具有 S-曲线、梯形曲线、速度控制和电子齿轮运动控制方式；
- ◆ 伺服控制采用可编程数字 PID+速度前馈+加速度前馈滤波方式；
- ◆ 程序缓冲区，实现运动轨迹预处理，以获得高质量的运动控制；
- ◆ 可编程设置伺服周期，缺省为 200 微秒（四轴）；
- ◆ 看门狗，实时监测 DSP 工作状态；
- ◆ 基于坐标系编程的连续轨迹控制，可实现空间直线、圆弧插补运动；
- ◆ 硬件捕获，编码器 Index 信号和原点 Home 信号，保证控制系统具有较高的重复定位精度；
- ◆ 安全措施，可编程设置跟随误差极限、加速度极限、控制输出极限等参数；
- ◆ 模拟量输出（每轴一路），提供 16 位 D/A 模拟电压控制信号（-10V~+10V）用于伺服电机控制；
- ◆ 脉冲输出（每轴一路），最高频率 1MHz，用于步进电机及脉冲方式控制的伺服电机控制，与模拟量输出两种输出信号能够自由组合；
- ◆ 专用输入，正、负限位开关，原点开关及伺服报警输入接口各 4 路；
- ◆ 专用输出，伺服使能，报警清除各 4 路；
- ◆ 编码器输入（每轴一路），4 路四倍频增量式编码器反馈信号接口，输入信号频率最高可达 8MHz；
- ◆ 辅助编码器，2 路四倍频增量式编码器辅助反馈信号接口，适应用户特殊功能要求，输入信号频率最高可达 8MHz；
- ◆ 16 路光电隔离通用数字输入信号接口；

- ◆ 16路光电隔离通用数字输出信号接口；
- ◆ 1路编码器锁存输入信号接口，占用1路通用数字输入信号接口，可选功能；

该控制器满足弯管运动控制的实时性要求，具有结构紧凑、抗干扰能力强等特点，可选配 DOS、WinCE 和 Windows XP 等操作系统（本系统选配 Windows XP），并配有许多接口可方便进行功能扩展。嵌入式运动控制器的各接口如图 4.3 所示，各接口作用说明如下：HMI，人机界面接口；VGA，标准 VGA 显示器接；KB/MS，键盘、鼠标接口；USB，双层 USB2.0 接口；LAN，以太网接口；RS232，通用串行口；EXT I/O，高速 IO 现场总线扩展接口；I/O (CN2)，I/O 接口，与端子板接口 CN2 连接；MOTION (CN1)，运动控制接口，与端子板接口 CN1 连接；POWER，电源接口，接 24V 直流电源。

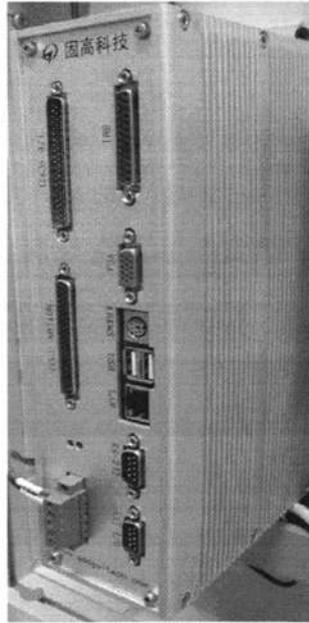


图 4.2 固高嵌入式运动控制器

Fig4.2 Googol embedded motion controller

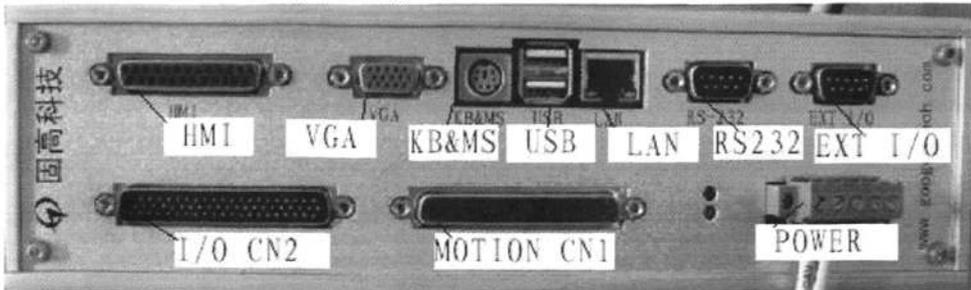


图 4.3 控制器接口

Fig4.3 The interface of the said controller

## 4.2.2 端子板 GT400-ACC2

系统所选控制器是一款通用型嵌入式运动控制器，需外接与之相配套的端子板 GT400-ACC2 才能与驱动器及外部输入输出设备相连。端子板 GT400-ACC2 外形如图 4.4 和 4.5 所示。此外，须通过 CN3 给端子板提供+12/+24V 的工作电压（本系统供+24V 工作电压）。

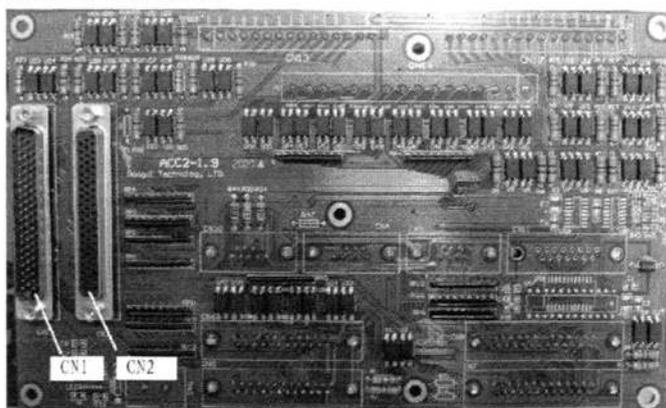


图 4.4 GT400-ACC2 与控制器连接一侧

Fig4.4 The side connected to controller of GT400-ACC2

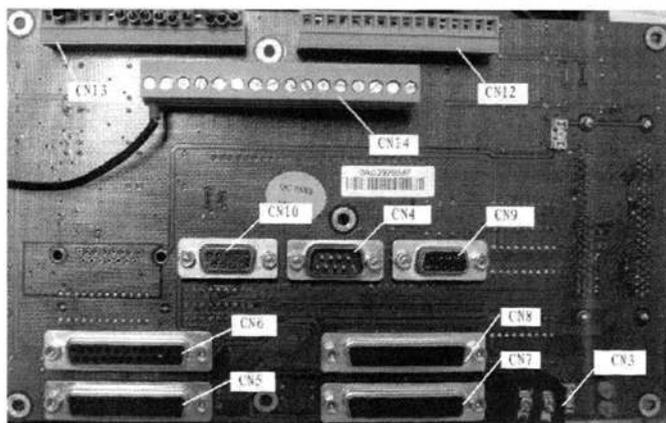


图 4.5 GT400-ACC2 另一侧

Fig4.4 The other side of GT400-ACC2

I/O 接口和运动控制接口与端子板对照见表 4.1，其中通用输入输出 I/O 和专用 I/O 共有 44 路，均 TTL 兼容，输出无上拉电阻。辅助编码器和驱动器接口详细定义分别见表 4.2、表 4.3。

表 4.1 端子板与嵌入式运动控制器对应接口说明

Table 4.1 Interface specification of end board VS embedded motion controller

名称	数量	说明
通用 I/O 输入	16 路	CN13 中 14 路、CN12 中 2 路
通用 I/O 输出	16 路	CN14
专用 I/O 输入	12 路	CN12, 原点及正、负限位各 4 路
驱动器接口	4 个	CN5、CN6、CN7、CN8, 包含编码器接口等
辅助编码器接口	2 个	CN9、CN10
AD 转换输入口	8 路	CN11 (功能可选, 本端子板未选)
RS232	1 个	CN4

表 4.2 辅助编码器接口定义

Table 4.2 Definition of auxiliary encoder interface

引脚	信号	说明	引脚	信号	说明
1	A+	编码器输入	6	A-	编码器输入
2	B+	编码器输入	7	B-	编码器输入
3	C+	编码器输入	8	C-	编码器输入
4			9	GND	数字地
5	+5V	电源输出			

表 4.3 驱动器接口定义

Table 4.3 Definition of driver interface

引脚	信号	说明	引脚	信号	说明
1	OGND	+24V 电源地	14	OVCC	+24V 电源输出
2	ALM	驱动报警	15	RESET	驱动报警复位
3	ENABLE	驱动允许	16	保留	保留
4	A-	编码器输入	17	A+	编码器输入
5	B-	编码器输入	18	B+	编码器输入
6	C-	编码器输入	19	C+	编码器输入
7	+5V	+5V 电源输出	20	GND	+5V 电源地
8	DAC	模拟输出	21	GND	+5V 电源地
9	DIR+	步进方向输出	22	DIR-	步进方向输出
10	GND	+5V 电源地	23	PULSE+	步进脉冲输出
11	PULSE-	步进脉冲输出	24	GND	+5V 电源地
12	保留	保留	25	保留	保留
13	GND	+5V 电源地			

#### 4.2.3 操作面板 ACC6-PN5-T12-K61

操作面板 ACC6-PN5-T12-K61 主要用于数控程序的编辑、控制机床的运动和系统监视等，其外观如图 4.6 所示。ACC6-PN5 带有一个分辨率为  $800 \times 600$  像素的 12 英寸高亮真彩 TFT 液晶显示器。该显示器支持触摸功能，为 4 线电阻屏，可通过 HMI 接口与控制器相连，作为系统的人机界面。另外面板前端有薄膜键盘，包括底部的  $F_1 \sim F_8$  八个功能键、右侧的水平和垂直功能键以及字母、数字等共 61 个按键，通过 RS232 串行接口与控制器相连，可方便进行编程操作。操作面板工作电压为直流 24V，通过与嵌入式运动控制器及端子板组合和连接相应接线，可组成所需主控系统。



图 4.6 操作面板 ACC6-PN5-T12-K61  
Fig4.6 Operation panel ACC6-PN5-T12-K61

### 4.3 交流伺服驱动控制系统

#### 4.3.1 伺服驱动系统控制方式<sup>[39]</sup>

在运动控制系统中，按系统的构造特点分类，伺服系统大体可分为开环、半闭环和全闭环三类伺服控制系统。开环伺服系统是一种不带检测装置，没有反馈的控制系统。这种系统通常采用步进电机作为伺服执行器件，系统控制精度很大程度上取决于步进电机的步距角及传动机构的精度等。这种方式控制简单，价格比较低廉，被广泛应用于经济型数控系统中。而半闭环和闭环伺服系统具有位移

测量和位置比较环节,这样可达到比开环系统更高的精度和运行速度。一般在半闭环伺服系统中,检测元件被安装在电动机轴端,通过角位移的测量间接计算出机床工作台的实际运行位置。一般由于半闭环的环路内不包括传动机构、执行机构等这些大惯性环节,由这些环节造成的误差不能由环路所矫正,其控制精度不如闭环控制数控系统。但其调试方便,可以获得比较稳定的控制特性,因此在实际应用中,这种方式被广泛采用。而全闭环伺服系统中,位置检测装置安装在机床工作台上,用以检测机床工作台的实际运行位置。这类控制方式的位置控制精度很高,一般用于中高档伺服控制。

据考察,目前业界存在的主要问题是弯曲角度和送料长度精度不高。分析其原因在于:弯曲轴采用液压动力,由于其本身受温度影响较大,且具有惯性大等缺点而导致弯曲角度精度低;送料轴采用齿轮齿条传动、半闭环控制,导致送料长度精度低。因此,本控制系统将弯曲轴改成由伺服电机驱动全闭环控制,在工作台送料轴方向安装光栅尺,将其构成全闭环控制,从而提高系统控制精度。空间转角 B 轴由于采用圆柱直齿轮传动,结构相对简单,传动精度高,直接采用半闭环控制即可达到控制要求。Y、B、C 各轴的控制原理分别如图 4.7、4.8 及 4.9 所示,主要参数如表 4.4 示。

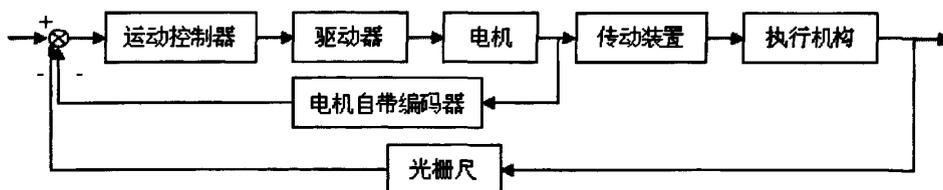


图 4.7 Y 轴全闭环控制回路

Fig4.7 All closed-loop control circuit of Y-Axis

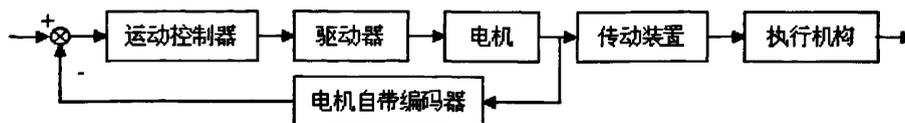


图 4.8 B 轴半闭环控制回路

Fig4.8 Semi-closed-loop control circuit of B-Axis

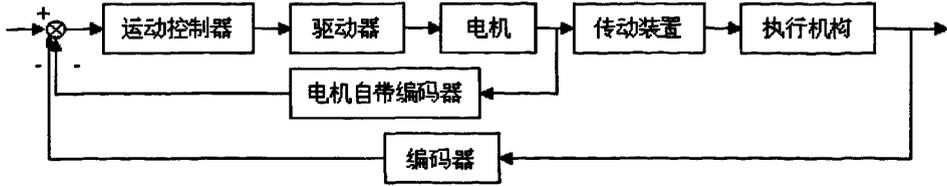


图 4.9 C 轴全闭环控制回路

Fig4.9 All closed-loop control circuit of C-Axis

表 4.4 各坐标轴参数

Table4.4 Parameters of every axis

	Y 轴	B 轴	C 轴
传动机构	一级圆柱齿轮、二级齿轮齿条	圆柱直齿轮	蜗轮蜗杆
行程	2000mm	±180°	180°

### 4.3.2 伺服驱动器及伺服电机选择

伺服系统在机电设备中具有重要的地位，高性能的伺服系统可以提供灵活、方便、准确、快速的驱动。电气伺服系统根据所驱动的电机类型分为直流（DC）伺服和交流（AC）伺服。20 世纪 50 年代，直流电机实现了产品化，并且出现了无刷直流电机，在计算机外围设备和机械设备上获得了广泛的应用。但直流伺服电机存在机械结构复杂、维护工作量大等缺点，在运行过程中转子容易发热，影响了与其连接的其他机械设备的精度，难以应用到高速及大容量的场合。机械换向器则成为直流伺服驱动技术发展的瓶颈。无刷直流电机则由于价格昂贵，影响了其普及应用。20 世纪 80 年代初期，随着微处理器技术、大功率高性能半导体功率器件技术和电机永磁材料制造工艺的发展及其性价比的日益提高，交流伺服电机及驱动控制系统逐渐成为主导产品<sup>[40]</sup>。随着技术的进步和整个工业的不断发展，拖动系统的发展趋势是用交流伺服驱动取代传统的液压、直流、步进和变频调速驱动，以便使系统性能达到一个全新的水平，包括更短的周期、更高的生产率、更好的可靠性和更长的寿命。

目前，控制精度更高、速度更快、使用更方便的交流伺服产品已广泛应用于工厂自动化等各个领域。本系统选用了三套松下 MINAS A4 系列的交流伺服驱动器及伺服电机，用于控制弯管机的送料轴、弯曲轴和转角轴的运动，详细参数见表 4.5。松下 MINAS A4 系列全数字式交流伺服内部控制采用 32 位 DSP，运

用 IGBT PWM 控制方式, 具有以下特点: 高性能的实时自动增益调整; 高速高响应, 速度响应频率最高达 1000Hz; 低振动, 先进的振动抑制技术, 控制低刚性结构的震动; 位置指令脉冲最大频率可达 2Mbps; 体积小, 利用最新技术, 实现体积比以往产品减小 75%; 全闭环控制, 可通过串行接口与外部光栅尺相连, 对位置进行全闭环控制等<sup>[41]</sup>。该系列驱动器带有参数设定功能, 如可通过参数 Pr02 设定控制方式—系统有位置控制、速度控制、转矩控制及复合控制(位置速度、位置转矩、速度转矩)等多种控制模式。通过驱动器前端面板可以设置各项参数, 使伺服系统工作在最佳状态。

表 4.5 各轴伺服电机和驱动器型号  
Table4.5 Driver and moter of each axis

	Y 轴	B 轴	C 轴
驱动器型号	MDDDT5540	MCDDT3520	MFDDTA390
电机型号	MSMA102P1H	MSMD082P1T	MSMA302P1H
功率	1.0KW	750W	3.0KW

## 4.4 液压控制系统

### 4.4.1 液压系统基本组成

液压控制系统用来控制弯管辅助动作, 主要由液压泵、液压泵电机、减压阀、溢流阀、电磁阀、液压缸、滤油器、冷却器等元器件组成。该部分主要由合作单位负责, 这里仅对系统作简单介绍。如图 4.10 所示, 为防止系统油温过高, 在回油路上采用冷却器对其进行冷却; 对随动缸进行节流调速, 使随动模在弯管时尽量能够跟随管料一起向前同步运动; 利用减压阀保证各动作所需压力稳定。

由于电磁阀需+24V、1A 左右的直流电压驱动, 运动控制器输出的控制信号需通过中间继电器以间接控制电磁阀的得电、失电。结合接近开关等传感器信号, 以正确的逻辑顺序发送指令控制继电器, 从而达到控制辅助动作的目的。这种采用电、液结合的综合控制方法可以发挥两者的优点, 比单纯液压系统具有更高的效率, 是目前普遍采用的方法。

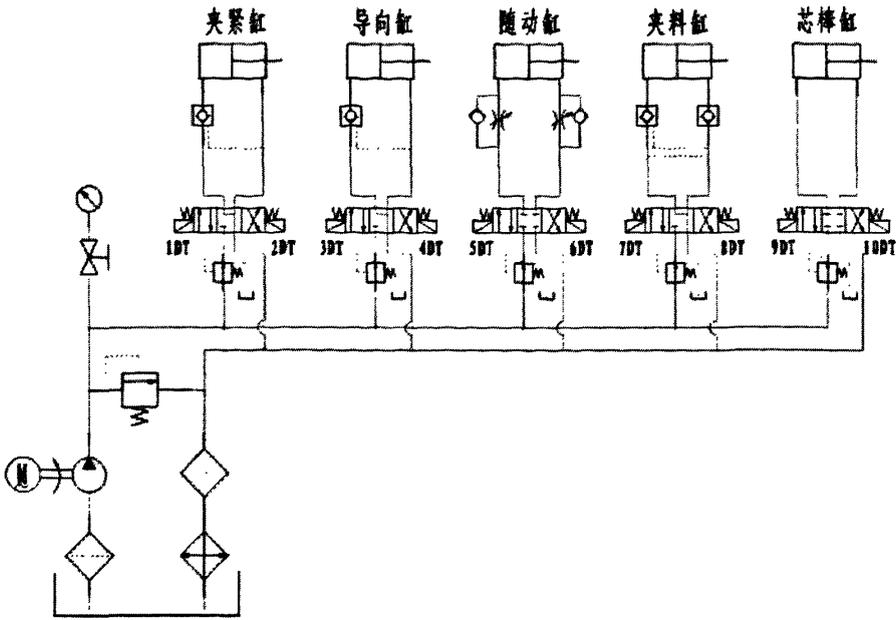


图 4.10 液压系统回路原理图

Fig4.10 Schematic diagram of the hydraulic system circuit

#### 4.4.2 电磁阀—输出接口分配

为方便编程，将从通用输出接口第 2 引脚起到第 13 引脚分配给电磁阀的电磁铁控制端相应的继电器，详见表 4.6。

表 4.6 电磁阀与通用输出接口分配

Table4.6 Distribution of output-interface connected to magnetic valve

引脚	信号	说明	引脚	信号	说明
1	EXO0		9	EXO8	8DT 继电器
2	EXO1	1DT 继电器	10	EXO9	9DT 继电器
3	EXO2	2DT 继电器	11	EXO10	10DT 继电器
4	EXO3	3DT 继电器	12	EXO11	
5	EXO4	4DT 继电器	13	EXO12	
6	EXO5	5DT 继电器	14	EXO13	
7	EXO6	6DT 继电器	15	EXO14	
8	EXO7	7DT 继电器	16	EXO15	

## 4.5 反馈元件选择及硬件接线

### 4.5.1 反馈元件选择

数控弯管机是一种程序控制使机床动作将管材弯曲成形的自动化机床。它综合了机械、自动化、计算机、测量等最新技术，需要使用多种传感器。一般数控机床对传感器的选择有以下几项要求：可靠性高和抗干扰性强；满足精度和速度的要求；使用维护方便，适合机床运行环境；价格合适。

根据控制系统需要，本系统主要需要用来检测位置、直线位移和角位移等几类传感器。位置检测传感器用来作为系统的限位开关、原点开关和接近开关。限位开关，用于极限位置保护，限定行程；原点开关，用于回原点建立机床坐标系；接近开关，用于检测各辅助动作是否到位。Y轴为直线送进轴，系统在Y轴的正、负极限位置处安装限位开关来保护系统，并在靠近负限位开关处安装原点开关。根据安全标准，限位开关须接成常闭状态，原点开关为常开状态。考虑到原点开关须具有重复定位精度高，限位开关、接近开关须灵敏度高，及安装位置的要求等，本系统各位置检测传感器均选用非接触式类型。同时由于被测对象均为金属导体，所以都选用电涡流式位置检测传感器，此外它的响应频率高、抗干扰性能好、应用范围广、价格较低。

除了以上开关量传感器之外，系统还需要能够连续测量直线位移和角位移的传感器，用来保证系统的精度。精度是机床必须保证的一项性能指标。位置伺服控制系统的位置精度在很大程度上决定了数控机床的加工精度。因此位置精度是一个极为重要的指标。为了保证有足够的位置精度，一方面是正确选择系统中开环放大倍数的大小，另一方面是对位置检测元件提出精度的要求。因为在闭环控制系统中，对于检测元件本身的误差和被检测量的偏差是很难区分出来的，反馈检测元件的精度对系统的精度常常起着决定性的作用。所选择的测量元件的分辨率或脉冲当量，一般要求比加工精度高一个数量级。

位移测量的传感器主要有脉冲编码器、光栅尺、磁栅尺、旋转变压器、感应同步器等。其中，光栅尺具有精度高、响应速度快等优点，尤其是输出信号可以直接与数字电路接口相连。另外光栅尺的价格也较为适中，因而在该系统中选用光栅尺作为直线位移的反馈部件。而回转轴反馈部件则采用常见的光电脉冲编码

器。如图 4.7、4.8、4.9 所示，Y 轴为直线运动，B、C 轴为回转运动，其中 B 轴通过伺服电机自带编码器反馈信息构成半闭环，Y 轴、C 轴分别通过光栅尺、光电编码器构成全闭环。

光栅尺由定尺、动尺、光源、光电转换器件等组成，其测量直线位移的原理原理是：当动尺相对于定尺每运动一个栅距时，光栅尺的输出电信号会变化一个周期，产生一个脉冲。通过记录电信号的变化周期数，即脉冲数，就等于记录了定尺与动尺相对运动的栅距的个数，从而可以测量出运动的实际直线位移量。换言之，光栅尺在动尺随平台运动中将实际位移转换为脉冲量，通过脉冲计数和换算得出平台移动的实际距离，运动方向通过相位信号差确定。

该系统选用了韩国东山公司的 JENIX 光栅尺，型号为 JSS1L-2000MM，分辨率为 1 微米，满足系统的精度要求。该光栅尺的接口说明如图 4.11 所示。

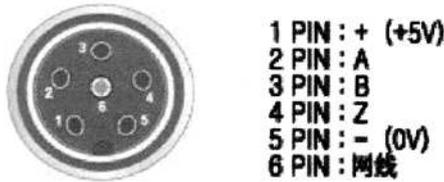


图 4.11 光栅尺接口说明

Fig.4.11 Interface specification of grating-rule

#### 4.5.2 系统硬件接线

YBC 三轴利用交流伺服电机自带编码器构成速度环，须采用速度控制方式，通过驱动器前端面板将参数 Pr02 设置为 1。根据表 4.3 及伺服驱动器的说明书，运动控制器与伺服驱动器的接线如图 4.12 所示，除去虚线部分即为速度控制方式接线，控制器上电默认模拟电压输出。

根据表 4.2 及图 4.11 光栅尺接口说明，光栅尺与辅助编码器接口的接线如图 4.13 所示。由于光栅尺只提供了 A、B、Z 三个信号端和两路电压接线端，所以只能将其接为单端输入，其余未接端口悬空即可。光电编码器的接法与此相同，其端子与端子板 CN10 相连。

硬件系统的总体接线原理如图 4.14 所示。10 路通用 I/O 输入，5 路通用 I/O 输出，3 路伺服驱动，2 路辅助编码器，及各轴限位开关、原点开关由专用输入接口输入。系统 I/O 口足够现场使用，不需另外扩展接口。

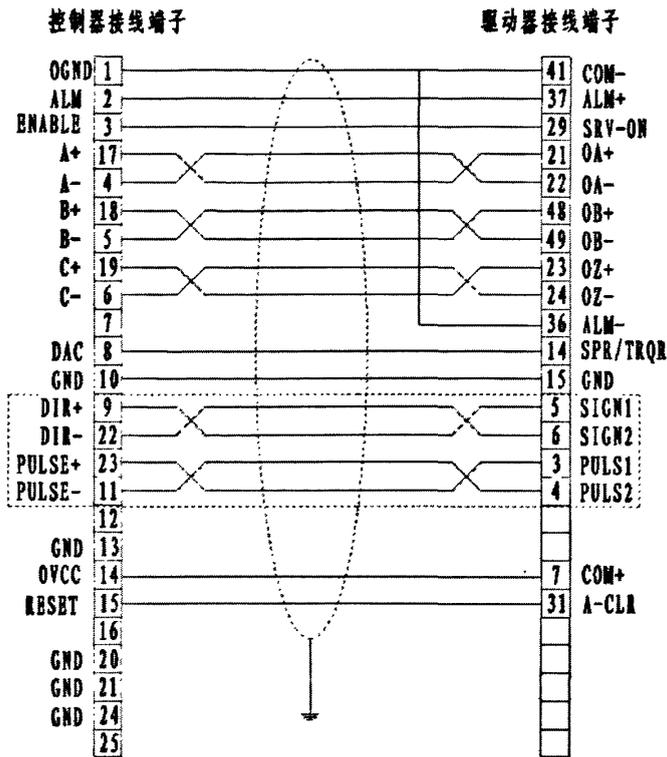


图 4.12 控制器与松下 MINAS A4 系列驱动器的接线图

Fig4.12 Wiring diagram of controller and Panasonic MINAS A4-series drivers

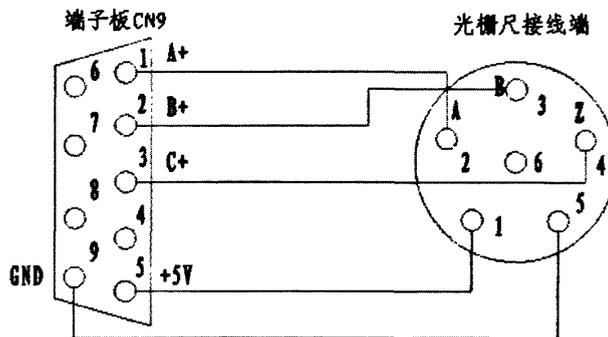


图 4.13 光栅尺接线图

Fig4.13 Wiring diagram of grating-rule

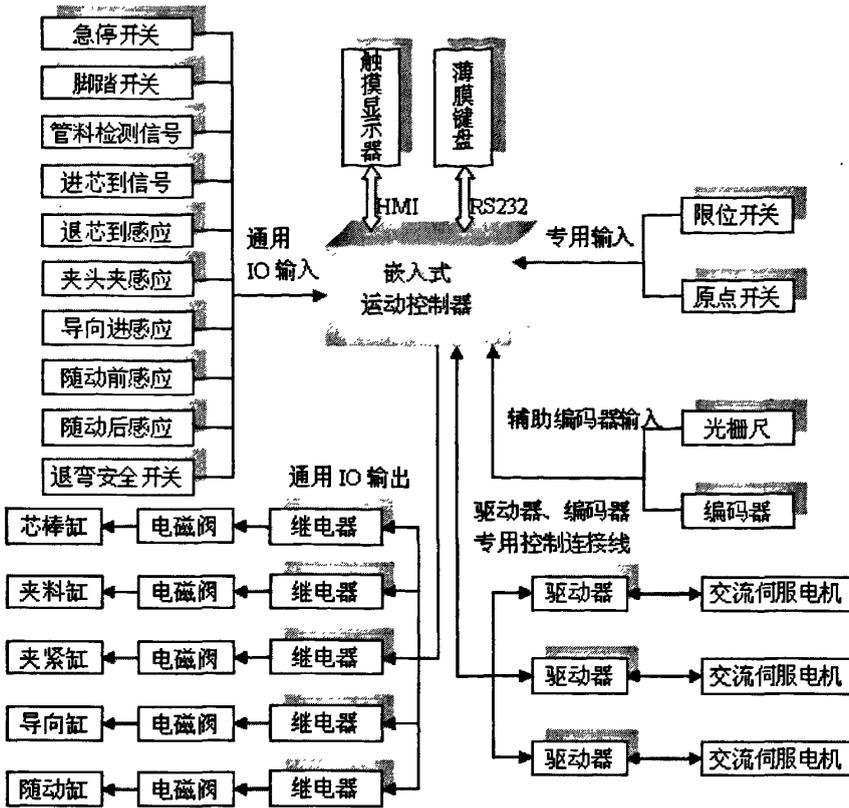


图 4.14 硬件系统接线原理图

Fig4.14 Schematic wiring diagram of the hardware system

## 4.6 硬件抗干扰措施

在工业控制系统中，一切电、磁、振动等都有可能对系统造成干扰。这将会影响系统的控制精度，以至于导致产品质量下降、甚至系统瘫痪等。因此，必须采取有效的措施抑制或消除信号干扰，以保证系统稳定运行。常见的影响控制系统的干扰主要为电磁干扰，其来源主要有：电源、大电流传输以及输入输出通道等。

### 4.6.1 电源及大电流传输引入干扰的抑制

工业控制系统的电源一般都是直接接自电网，为交流电。系统中大功率设备的启停、负载电流的快速变化等都会产生干扰，使电网电压波形发生畸变，并由电网传入控制系统。为了抑制电源干扰，本系统采用以下电源方案：

1、直流稳压电源：本系统中，嵌入式运动控制器、操作面板及端子板等均采用了可靠的+24V 直流稳压电源模块供电，保证了系统电压的稳定，并减少了交流电源使用，只有液压泵电机和伺服驱动器采用交流电源；

2、隔离变压器：在供电线路上采用隔离变压器进行电源干扰隔离。为了达到良好的干扰抑制效果，将变压器的屏蔽层接地，这样能够起到静电屏蔽的作用。变压器的次级线圈使用双绞线，双绞线不仅能够提高硬件对电磁场的抗干扰能力，而且传输电流在两线中对称分布，产生的电磁场可以相互抵消，因而也减少了对其他回路的干扰。

大电流导线传输引起的干扰主要包括静电场、高频电磁场以及磁场引起的干扰，对于这类干扰主要采用隔离、屏蔽和正确的接地方法加以解决。将易受干扰的设备和信号远离干扰源；对易受干扰的信号采用屏蔽导线、双绞线<sup>[6]</sup>。

#### 4.6.2 过程通道的抗干扰措施

在过程通道中，信号线上的干扰主要是来自空间的电磁辐射，本系统采用如下措施：

1、采用光电隔离的方法，为了防止外界电气信号干扰，在输入输出通道端口均采用了光电隔离。

2、编码器、光栅尺以及运动控制器与端子板之间的信号传输均采用屏蔽线，单端接地，能够有效抑制干扰。

除此之外，电源及信号线的合理布局也很重要，一般线路要尽量短，信号线和动力线分开配线，避免两者接近并且分开一定的距离，一般至少为 40 公分。

#### 4.7 本章小结

本章主要设计了弯管控制系统的硬件部分，选择固高嵌入式运动控制器为系统控制核心，确定送料、转角、弯曲三个主要运动轴由交流伺服系统精确控制，其他辅助动作由液压系统开环控制的电液综合控制方法。合理分配输入输出接口，并给出了各主要硬件的详细电气接线图以及总体接线原理图。

## 第五章 数控弯管机软件系统设计

上一章设计了控制系统的硬件结构，但如何让系统能够按照要求正常工作，还需要设计合理的软件系统，即应用程序。软件系统作为控制系统的灵魂，设计需满足可靠性高，可移植性、可扩展性和操作性好。其性能优劣与整个系统的关系极大，并在很大程度上决定了整个控制系统的效率及各项功能的实现。本章将着重介绍软件系统各部分的实现及重要、关键技术的实现过程。

### 5.1 软件开发平台

考虑到程序可读性、兼容性、可移植性与硬件相关性，本系统在 Windows XP 操作系统平台和 VC++6.0 集成开发环境下，采用 C++ 编程语言进行弯管数控软件的开发，开发完直接移植到控制器系统中即可。这样可以充分利用 Windows 丰富的资源，缩短控制软件的开发周期，易于实现软件系统友好界面的设计，更是方便了用户使用。

#### 5.1.1 Windows XP 操作系统

Windows 是一个多任务的图形用户界面操作系统，其应用程序与 DOS 应用程序有很大的区别。DOS 应用程序的用户界面一般都是基于字符方式，内部采用顺序执行过程和中断机制。就如结构化程序设计语言所描述的那样，DOS 应用程序包括顺序结构、选择结构和循环结构三种基本结构，程序结构比较简单。在执行流程上，DOS 应用程序采用过程驱动的方式，程序根据用户输入条件，按照事先安排好的顺序运行<sup>[47]</sup>。

Windows 是一个基于事件驱动、消息响应的操作系统，其应用程序以窗口的形式出现，内部采用消息处理机制。在执行流程上，Windows 应用程序采用事件驱动的方式，即程序不是按照事先安排好的顺序运行，而是按照“事件→消息→处理”的随机方式运行<sup>[42]</sup>。作为多任务操作系统，同时可以运行多个进程，每个进程又可同时执行多个线程，其中有一个为主线程。操作系统通过循环的方式为每个运行的线程分配一定的 CPU 时间—时间片。由于时间片相当短及人眼视

觉延迟的存在，因此给用户的感觉就好像是多个线程同时运行一样<sup>[43]</sup>。

由于系统的运行机制不同，所以基于 Windows 系统的程序设计是一种完全不同于传统 DOS 方式的程序设计方法。鉴于目前 Windows XP 操作系统兼容性和稳定性较好，本系统选择在该操作系统平台上进行软件开发。同时与控制器配置的系统相同，软件开发后不经任何修改，即可直接移植到控制器的系统中运行。

## 5.1.2 C++编程语言与 VC++6.0 集成开发环境

### 1、C++编程语言及其特点

C++语言是 20 世纪 80 年代由贝尔实验室 Bjarne Stroustrup 推出的，最初它被称为“带类的 C”。C++不仅保持了 C 语言简洁、高效和可移植性好等特点，而且还支持面向对象的程序设计方法。尤其是在 1998 年推出了 ANSI C++ 国际标准之后，C++的应用越来越广泛，其流行程度不亚于当初的 C 语言。

作为 C 语言的继承者，C++继承了 C 的以下特点：丰富的运算符和数据类型、结构化的程序设计方法、高效的机器代码、良好的可移植性。同时由于 C++是 C 的超集，C++与 C 保持高度兼容，这使得许多 C 代码不需修改就可以在 C++程序中使用<sup>[44][45]</sup>。

C++扩展了 C 的功能，增加了面向对象机制。C++既支持传统的结构化程序设计，也支持当今的面向对象程序设计。利用面向对象程序设计技术实现了软件重用，提高了软件开发效率。与 C 语言相比，C++的错误检查机制强，它提供了专门的机制检查类，更适合大、中型程序的开发。同时，C++非常强调代码的有效性和紧凑性。事实表明，C++语言可用于 C 语言的所有应用领域，且其效果要比 C 语言好得多。

C++已经成为当今主流的程序设计语言，它是一种编译性高级语言，源程序需要通过编译、链接后才能生成可执行程序。各大知名公司都已纷纷推出自己的 C++编译器，如微软公司的 Visual C++、Borland 公司的 Borland C++、Inprise 公司（现已被 Borland 兼并）的 C++ Builder 和 IBM 公司的 VisualAge C++等。

### 2、VC++6.0 集成开发环境

Visual C++(简称 VC++)是微软公司于 1993 年推出的一个可视化集成开发环境 (integrated development environment, IDE)。它是在 Windows 平台下构建 32

位应用程序强大而又复杂的开发工具，是目前世界上使用最多的开发工具之一。自 1998 年微软公司推出功能完善的 VC++6.0 后，越来越多的程序员选用 VC++ 作为软件开发工具。其源程序采用 C/C++ 语言编写，支持面向对象程序设计，并能够使用功能强大的微软基础类库 MFC (Microsoft foundation class)。MFC 类库采用面向对象技术封装了 95% 以上的 API (Application Programming Interface)，涉及界面编程、系统编程、数据库编程等方面，充分体现了微软公司的技术精华。使用 MFC 可节省软件开发人员很多时间，让其能够将更多的精力投入应用程序的功能开发，从而提高效率、缩短软件开发周期<sup>[34][46][47]</sup>。

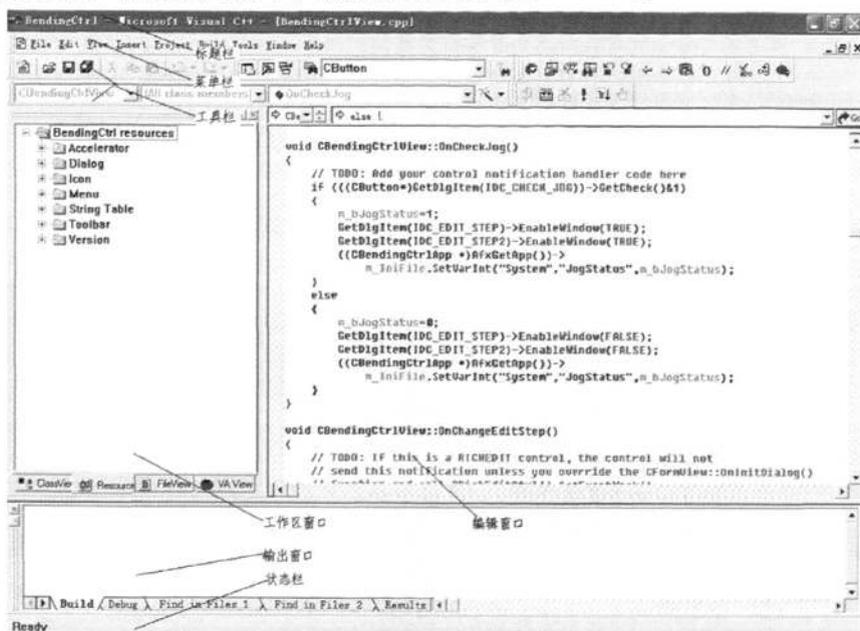


图 5.1 Visual C++6.0 集成开发环境

Fig5.1 Visual C++6.0 integrated development environment

VC++6.0 集成开发环境由许多组件组成，包括编辑器、编译器、调试器以及程序向导 AppWizard、类向导 ClassWizard 等。这些组件通过一个名为 Developer Studio 的组件集成为一个和谐的开发环境。其界面如图 5.1 所示，主要由工作区窗口、编辑窗口、输出窗口以及标题栏、菜单栏、工具栏等组成。

由于 Windows 操作系统的市场垄断地位，利用 VC++ 开发出来的软件具有稳定性好、可移植性强的特点。同时，本系统采用的运动控制器提供了 C 语言的运动控制函数的动态链接库及相应的驱动程序，所以我们可以采用 VC++6.0 编写、调试和运行基于 MFC 及 C++ 语言的程序，进行上位机应用软件的开发。

## 5.2 数控弯管机软件系统设计思路

本软件系统的开发采用了软件工程的先进思想—模块化设计及面向对象程序设计方法，程序结构清晰，可读性高。并充分利用多任务并行处理和定时中断处理，完成文件管理、系统设置、数控加工和系统监控等功能，软件系统功能结构见图 3.2。除此之外，软件系统还应提供友好的应用界面，并适时建立、关闭 PC 部分与运动控制卡的通讯。

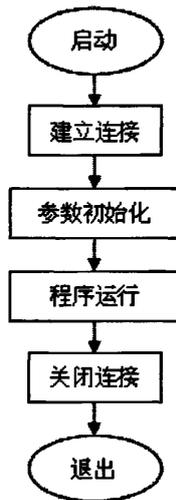


图 5.2 应用程序软件执行过程  
Fig5.2 The application running process

应用程序的执行过程如图 5.2 所示，由于本控制系统运动控制部分由控制卡部分完成，软件界面、参数设置等由 PC 部分实现，即相当于上下位机的控制模式，所以在运行程序之前需先建立 PC 部分与运动控制卡之间的通讯，并在退出程序之前关闭通讯连接。下面详细介绍各功能的实现。

## 5.3 软件系统各主要功能实现

### 5.3.1 驱动程序及功能函数封装

控制器内部运动控制卡通过 PCI 接口与 PC 部分相连，运动控制卡中包括运动控制驱动接口、通用输入输出接口、辅助编码器接口、专用输入接口等。软件

系统与硬件系统的结合是通过硬件驱动程序以及功能函数来实现的。驱动程序和功能函数一般由控制器厂家随硬件提供。

系统所选运动控制器自带驱动程序，功能函数的动态链接库和 VC、VB、Delphi 的函数头文件（声明文件）。本系统软件是在 VC++ 开发环境中开发的，在编程过程中，首先正确安装驱动程序，然后再将相应的动态链接库 (\*.dll) 和头文件 (\*.h) 包含在应用程序中和即可调用其内部函数进行编程。

虽然随运动控制器提供了功能函数的动态链接库和函数头文件，但为了方便在本控制系统中的具体应用，需对其进行必要的封装。本系统中将所有功能函数单独封装在类 CGUCCard 中。下面以运动控制卡的开启（建立通讯）和关闭（断开通讯）为例介绍功能函数的封装。

如前所述，软件系统每次启动后须先运行板卡开启函数建立 PC 部分与控制卡之间的通讯，以获取对控制卡的访问权后，才能实现各种运动控制；在退出软件之前要先关闭运动控制卡、断开 PC 部分与控制卡之间的通讯。这里主要用到 GT\_Open(unsigned long address=65535) 和 GT\_Close(void) 两个函数，分别用来实现开卡和关卡操作。其中默认值 65535 为基地址，用于设置控制器的基地址，PCI 总线的运动控制器不需要专门指定运动控制器的基地址，调用该函数后，控制器将从该默认基地址连续占用 14 个主机 I/O 地址。此外，控制器所有功能函数的返回值均为 short 短整型，如果调用指令执行成功，则返回值为 0，否则为相应的出错代码。

对控制器开启函数的封装代码如下：

```
InitCard(unsigned short LmtSense,unsigned short HomeSense,unsigned short EncoderSense, unsigned short alarmStatus,unsigned short encoderStatus)
{
    short rtn;
    if(GT_Open())//开启控制卡，建立通讯连接
    {
        AfxMessageBox("\n 运动控制卡开启失败！\n\n",MB_OK|MB_ICONERROR);
        return 2;
    }
}
```

```

if(GT_Reset()!=0) // 重置控制器所有寄存器恢复到默认状态
{
    AfxMessageBox("运动控制卡重置错误!",MB_OK|MB_ICONERROR);
    return 1;
}
rtn=LmtSns(LmtSense); //设置运动控制器各轴限位开关触发电平
error(rtn); //返回值处理函数
rtn=HomeSns(HomeSense); error(rtn); //设置各轴原点开关触发沿
rtn=EncoderSns(EncoderSense); error(rtn); //设置各轴编码器计数方向
rtn=AlarmEnable(alarmStatus); error(rtn); // 设置驱动报警允许
rtn=EncoderEnable(encoderStatus);error(rtn); // 设置编码器计数允许
Sleep(50); //原型 void Sleep(DWORD dwMilliseconds), 可用于延时
return rtn;
}

```

上述代码功能为：开启运动控制卡，建立 PC 部分与运动控制卡之间的通讯。若失败返回值为零，弹出窗口显示“运动控制卡开启失败”以提醒用户；否则继续执行对板卡重置，若重置成功则再对板卡进行一些基本功能设置。这样可以确定建立通信是否成功，当出现故障时可以及时发现、确定故障原因。

在主程序实例初始化 `InitInstance()` 函数中进行了如下调用：

```

if( InitCard(m_nLmtSns,m_nHomeSns,m_nEncoderSns,m_nAlarmStatus,m_nEncoderStatus) == 2 )
{
    int nRet=AfxMessageBox("\n 继续运行程序? \n",\
    MB_ICONQUESTION|MB_YESNO); // 上行符号“\”为续行符
    if(IDNO==nRet)
        exit(1);
}

```

这样调用以后，若前述板卡开启失败提醒用户后，可以让用户选择继续进入程序还是直接关闭并退出，同时并不显示软件画面。

对控制器关闭函数的封装代码如下：

```
CloseCard()
{
    short rtn;
    for(int i=1;i<=axisCount;i++)//axisCount 为全局参数，表示运动轴数
    {
        rtn=GT_AxisOff(i);error(rtn);//各运动轴关闭
    }
    rtn=GT_Close();error(rtn);//运动控制卡关闭
    return rtn;
}
```

上述代码的功能为：关闭运动控制卡，断开 PC 部分与运动控制卡之间的通讯，并在关闭卡之前，先关闭各坐标轴。

此外，对控制器的其他参数设置等功能函数的封装不再一一赘述。

### 5.3.2 软件主界面设计

#### 1、主界面功能

系统需要实现参数设置、文件管理、自动加工、手动调整及坐标显示等功能，其中参数设置部分涉及到的参数较多，因此需将其分类，放在多个对话框中。需要设置的时候，点击相关按钮，弹出对话框，设置完，关闭对话框。在软件正常运行时只需显示部分与加工状态相关的参数。而在加工中常用到的文件管理、自动加工、手工调整及坐标显示等功能，为了操作方便，需将其置于软件主界面上。同时需为后续动态仿真开发预留窗口空间，所以应在主界面留出合适的窗口空间。

在 VC++6.0 开发环境下利用 MFC 开发应用程序，有三种模式：基于对话框（Dialog）的应用程序，基于单文档界面（SDI）的应用程序以及基于多文档界面（MDI）的应用程序。结合实际应用和多方面考虑，本系统采用基于单文档界面（SDI）开发软件。同时考虑到绝大多数人惯用右手，所以将相关常用操作放在界面右侧，预留窗口放在左侧，其他参数设置、操作等放在菜单栏的“工具”

和“操作”下拉菜单中，这样既可以保持总体界面简洁直观，又比较符合用户的使用习惯，方便操作。

## 2、主界面设计

为方便使用 MFC 提供的控件 (control)，像在对话框中设计界面一样，在由 AppWizard 建立单文档工程时选择 CFormView 类作为视类的基类。由于要为加工动态仿真预留窗口空间，需将用户窗口分割。

其实现过程如下：继承 CView 类创建子类 CDrawView；继承 CSplitterWnd 类创建子类 CSplitterWndEx；在类 CMainFrame 中创建 CSplitterWndEx 对象 m\_wndSplitter，重载 OnCreateClient，其实现代码如下：

```
OnCreateClient(LPCREATESTRUCT lpcs, CCreateContext* pContext)
{
    int cxClient=GetSystemMetrics(SM_CXSCREEN);//获取窗口 X 尺寸
    int cyClient=GetSystemMetrics(SM_CYSCREEN);//获取窗口 Y 尺寸
    if(!m_wndSplitter.CreateStatic(this, 1, 2))
    {
        TRACE0("Failed to CreateStaticSplitter\n");
        return FALSE;
    }
    // add the first splitter pane - the drawview in column 0
    if(!m_wndSplitter.CreateView(0, 0,RUNTIME_CLASS(CDrawView),
        CSize((int)(cxClient*0.68), 0), pContext)//预留窗口
    {
        TRACE0("Failed to create first pane\n");
        return FALSE;
    }
    // add the second splitter pane - an cformview in column 1
    if(!m_wndSplitter.CreateView(0, 1,RUNTIME_CLASS(CBendingCtrlView),
        CSize(0, 0), pContext)//右侧现用窗口
    {
        TRACE0("Failed to create second pane\n");
```

```
        return FALSE;
    }
    return TRUE;
}
```

在 VC++6.0 下由 MFC 创建的界面如果没做过任何处理，往往显的很生硬。为了使应用程序显得更加美观，在 WindowsXP 系统下作如下处理可让其具有 WindowsXP 的系统风格。打开记事本加入如下代码：

```
<?xml version="1.0" encoding="UTF-8" standalone="yes"?>
<assembly xmlns="urn:schemas-microsoft-com:asm.v1"
    manifestVersion="1.0">
  <assemblyIdentity
    version="1.0.0.0"
    processorArchitecture="X86"
    name="Microsoft.Windows.dummy"
    type="win32"
  />
  <description>Your app description here</description>
  <dependency>
    <dependentAssembly>
      <assemblyIdentity
        type="win32"
        name="Microsoft.Windows.Common-Controls"
        version="6.0.0.0"
        processorArchitecture="X86"
        publicKeyToken="6595b64144ccf1df"
        language="*"
      />
    </dependentAssembly>
  </dependency>
</assembly>
```

保存文件为\*.txt，然后将文件名改为“应用程序文件名.exe.manifest”，并将其放到应用程序同一文件夹下即可。最终程序主界面如图 5.3 所示。

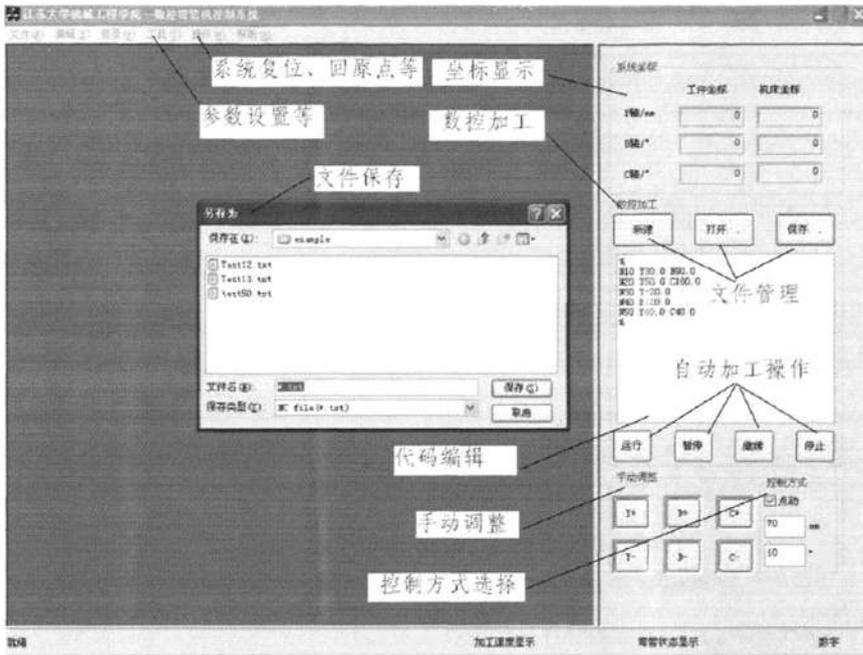


图 5.3 应用程序主界面

Fig5.3 The master interface of the application

### 5.3.3 工艺文件管理

本系统工艺文件的内容为 NC 代码程序段，以简单文本文件 txt 格式保存和读写，易于实现和维护。MFC 提供的 CFileDialog 类，可创建标准的打开文件和保存文件对话框；CStdioFile 类可实现文件的读写操作。该类继承于 CFile 类，具有丰富的文件处理函数。

以下为利用 CFileDialog 和 CStdioFile 类完成文件的写功能并实现文件保存部分代码，保存文件对话框见图 5.3:

OnFileSave()

```
{
    CStdioFile fs;//文件
    CString strLine;
    CString strNCFileName;//文件名
    CEdit * pGCodeEdit;
```

```
//判断编辑区内是否有内容需要保存
pGCodeEdit=(CEdit *) GetDlgItem(IDC_EDIT_GCODE); //获取文本框指针
if(pGCodeEdit->GetLineCount()<2) {
    AfxMessageBox("您尚未在 NC 代码编辑区中输入有效代码! ",MB_OK);
    return;}
... ..
CFileDialog fileDlg(FALSE,"txt","*.txt",OFN_HIDEREADONLY|
    OFN_OVERWRITEPROMPT, "NC file(*.txt)*.txt",NULL);
int result = fileDlg.DoModal();
if(result==IDOK) //显示文件保存对话框，若确定取回文件路径名
    strNCFileName = fileDlg.GetPathName();
else
    return;
//保存文件
if(fs.Open(strNCFileName, CFile::modeCreate |CFile::modeWrite)==NULL)
    { AfxMessageBox("文件操作出错! ",MB_OK); }
int nLineCount=pGCodeEdit->GetLineCount();//获取文本框数据行数
for(int i=0;i<nLineCount-1;i++)//将代码写入文件
{
    CString strBuffer;
    int nLength=pGCodeEdit->LineLength(pGCodeEdit->LineIndex(i));
    pGCodeEdit->GetLine(i,strBuffer.GetBuffer(nLength));
    strBuffer.ReleaseBuffer();
    strLine.Format("%s\n",strBuffer);
    fs.WriteString(strLine);
}
fs.Close();//关闭文件
bShouldSave=false;
}
```

### 5.3.4 参数设置

按照系统的权限将参数分为机床参数和系统参数两类。其中，机床参数是指机床出厂前根据自身特性经过校准最终所设定的参数。出于安全考虑，对其进行加密保护，一般终端用户无权访问，只对机床制造商开放，安全级别最高。系统参数，则是与生产工艺过程相关的一般参数，供用户使用。在系统允许范围内，用户可以根据需要对其进行修改。

#### 1、机床参数设置

机床参数主要包括：Y、B、C 各坐标轴机床坐标原点、工件坐标原点、当前机床坐标、当前工件坐标以及两坐标系之间的偏移量；各坐标轴的正、负方向行程范围；各轴电机参数；各轴工作速度、加速度的最大极限值；各轴回零速度、回零方式（本系统 Home 方式）；各轴捕捉到回零原点信号后离开原点开关的距离或角度；Y 轴机床原点与弯曲模具相切位置的距离；有芯弯曲加工管件长度的最大值；加工管件直径的最大值，一般以加工管件直径最大值设定弯管机的规格；其它参数等。

其中有些参数需要在程序中显示，如当前机床坐标、工件坐标；有些需要可设置，如回零速度；而有些参数则不必显示也不可设置，如机床坐标原点。这里只将不必在界面上显示的需设置的参数在对话框中实现。其他需显示和设置的在别的模块中实现，如工件坐标系显示在后面坐标显示处实现，其设置和建立在建立坐标系中实现。

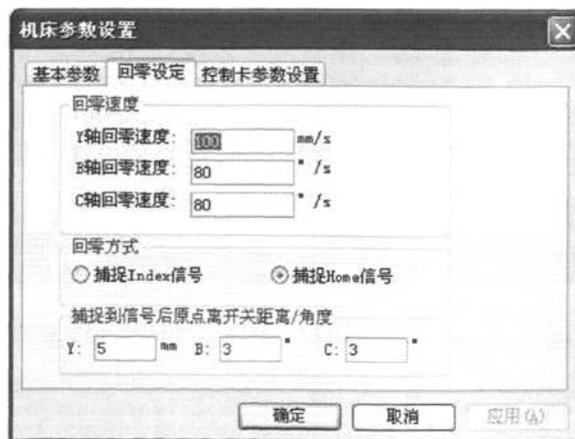


图 5.4 机床参数设置界面

Fig5.4 The setting interface of machine parameters

机床参数设置界面如图 5.4 所示，其主要实现过程是：创建三个基于 CPropertyPage 的子窗口资源，完成界面设计，在各窗口中实现输入数据的保存，并建立各自的类；在 CMainFrame 类中，“工具”下拉菜单“机床参数设置”项的响应函数中用类 CPropertySheet 建立属性表对象，并为其添加三个子窗口作为属性页，最终调用 DoModal()将对话框显示。

由于机床参数后需将控制器复位后方可生效，在设置完对话框数据并保存关闭后，提示用户进行复位。复位按钮响应函数的部分代码如下：

```
OnOpRestore()
{
    CBendingCtrlApp * pApp=(CBendingCtrlApp *)AfxGetApp();
    gucCard.CloseCard();
    gucCard.InitCard(pApp->m_nLmtSns,pApp->m_nHomeSns,
        pApp->m_nEncoderSns,pApp->m_nAlarmStatus,pApp->m_nEncoderStatus);
    gucCard.SetSynXXX(pApp->m_fSysVel,pApp->m_fSysAcc,pApp->m_fSysStrt,
        pApp->m_fStpAcc,pApp->m_fMaxVel);
    ... ..
    for (int i=1;i<=axisCount;i++)//设置完参数后将各轴状态清零
    {
        gucCard.ClrAxisStatus(i);
        gucCard.AxisEnable(i);
        Sleep(10);
    }
}
```

## 2、系统参数设置

系统参数与工艺相关，主要包括：速度、加速度参数，即 Y、B、C 各轴的手动速度、加工速度、加工空程速度及系统加速度、急停加速度等；伺服参数，各轴伺服系统的比例增益、微分增益、积分增益、误差积分限、位置误差极限等；时间参数，C 轴弯曲轴弯管动作延时时间、钳口主夹时间、导向辅夹时间、小车夹头夹料时间等；模具参数，弯曲模半径、导向模长宽、随动模长宽等；加工工

艺参数，单根管料弯曲次数、弯曲角度修正值、预送料长度、预转料角度、比例回弹系数、固定回弹系数等；管形参数，YBCR、管径、壁厚、管料实际长度及其他参数等；压力参数，主夹、辅夹等辅助动作压力参数，这类参数通过液压系统调节，不需进行软件设置。

这里将上述参数分为速度、加速度、伺服、时间和其他四个子模块设计。系统参数设置界面如图 5.5 所示，其实现过程与机床参数的大致相同，不再赘述。唯一的不同点在于，系统参数设置保存后，不需重启控制器，立即生效。



图 5.5 系统参数设置界面

Fig5.5 The setting interface of system parameters

图中伺服参数的设置关键代码如下：

```
short rtn;
for (int i=0;i<axisCount;i++)
{
    rtn=gucCard.SetServoPara(i+1,pApp->m_fKp[i],
        pApp->m_fKi[i],pApp->m_fKd[i],pApp->m_fKvff[i],
        pApp->m_fKaff[i],pApp->m_nMtrBias[i],pApp->m_nILmt[i],
        pApp->m_nMtrLmt[i],pApp->m_nPosErr[i]);
    if (0!=rtn)
    {
        MessageBox("伺服参数设置失败！","伺服参数设置");
    }
}
}
```

### 3、参数检查及范围设定

为保证输入参数的正确有效，系统须对用户输入的参数作检查。参数检查包括数据类型检查和有效性检查两种。其中有效性检查是判断窗口输入的数据是否在规定的范围之内。

CDialog 类中有对话框数据交换 DDX(Dilog Data Exchange)和对话框数据校验 DDV(Dilog Data Validation)功能。DDX 通过将控件与对话框类的成员变量关联，实现数据控件与对话框的数据交换功能，同时可以判断输入的数据类型是否正确。对话框数据校验 DDV 用于检查数据的有效性。两种功能都是通过 ClassWizard 类向导自动添加代码，在成员函数 DoDataExchange()中调用 DDX 和 DDV 全局函数实现。由于 CPropertyPage 类是从 CDialog 类继承而来，所以上述从 CPropertyPage 类继承的各个参数子窗口均可使用 DDX 和 DDV 实现参数检查。参数范围设定可以方便通过 ClassWizard 类向导设置实现。

参数范围设定如图 5.6 所示，设定 Y 轴伺服参数位置误差范围为[0,32767]。

由此 ClassWizard 类向导在成员函数 DoDataExchange()中添加以下代码：

```
DDX_Text(pDX, IDC_EDIT_KPOSERR_Y, m_nYPosErr);
```

```
DDV_MinMaxInt(pDX, m_nYPosErr, 0, 32767);
```

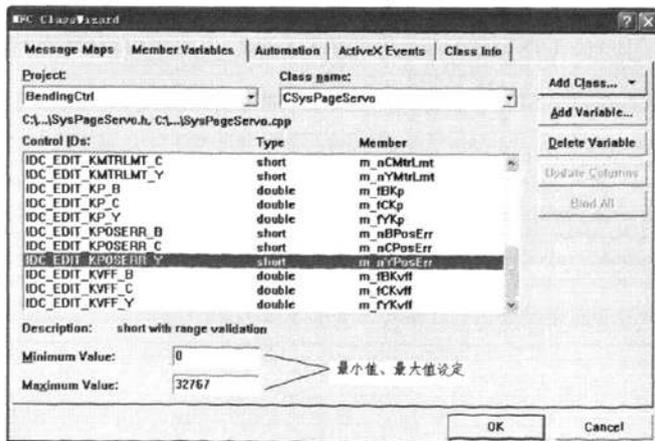


图 5.6 伺服参数范围设置

Fig5.6 The scale setting of servo parameters

### 4、参数保存、初始化

本程序用读写配置文件 (\*.INI) 的方法来保存记录各种参数与实现参数初始化，主要用到 GetPrivateProfileString、WritePrivateProfileString 两个函数。由于整个系统参数较多，且参数数据类型多样，本系统对其进行了封装。

### 5.3.5 坐标系建立

数控设备中坐标系通常分机床坐标系和工件坐标系两种,后者是在前者的基础上建立的。而机床坐标系又是由机床每次启动后通过回机床原点实现的。该原点是由设备制造厂家定义好的,是制造、调整机床的基础,在使用中用户不能改变。因此,本系统中,需通过 Y、B、C 各轴的回原点操作实现建立坐标系。

固高的 GUC 系列运动控制器提供了“Home”和“Home+Index”两种回原点方式。如图 5.7 所示,本系统采用 Home 方式进行机床回原点并建立坐标系,其主要步骤如下<sup>[48]</sup>:

- 1) 工作台向原点 (Home) 开关方向运动,启动 Home 捕获;
- 2) 当 Home 信号产生时,平滑停止工作台;
- 3) 调用指令 GT\_GetCapt 读取 Home 信号触发时工作台的实际位置,然后反向运动到回到该位置;
- 4) 继续向前运动一段指定距离,离开 Home 开关,等工作台停稳后调用指令 GT\_ZeroPos 将工作台位置清零,建立机床坐标系。

最后,在机床坐标系建立后,可让机床运动到任意位置等工作台停稳后调用指令 GT\_SetAtlPos 将当前位置设为指定值,建立工件坐标系。

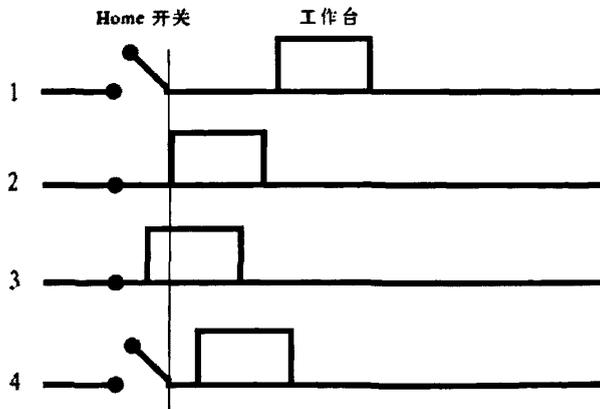


图 5.7 机床回原点过程示意图

Fig5.7 Sketch of machine homing process

### 5.3.6 坐标转换

通常弯管的设计信息是以图纸上的连接点坐标来表示管件的图纸数据,而数

控弯管加工中数控系统所需的不是连接点坐标数据,而是数控弯管机所专用的增量管形数据。因此在加工从图纸中的或是以笛卡尔坐标系绝对坐标表示的管形数据前需先将其转换为增量管形数据。

弯管加工与通常的切削加工不同,其采用的是矢量弯管技术。矢量弯管即是以矢量理论为基础,把管件看成是由一系列的直线段和圆弧组成<sup>[49]</sup>。在迪卡尔坐标系中,管件直线段中心线以一系列的空间矢量来表示,先求出各交点坐标,即弯管图纸上连接点的坐标值;然后再利用矢量的基本概念和运算法则精确计算出理论增量管形数据,即管件加工数据;将管件加工数据以数控加工程序方式输入,系统对其进行“回弹”修正;最后由控制器执行修正后的管件加工数据控制弯管机自动弯制所需的三维空间管形。

弯管自动加工需要以下三个方面的增量管形数据<sup>[50]</sup>:

1、两弯间的送料距离 DBB (Distance Between Bends), 为端点到直线与圆弧切点之间的距离或直线与两圆弧切点之间的距离,即 Y 轴小车直线送进距离。

2、空间转角 POB (Plane of Bend), 为当两个弯不在同一平面时,第二个弯所在平面与第一个弯所在平面的夹角,即 B 轴小车夹头的转角。

3、弯曲角度 DOB (Degree of Bend), 一个弯的第二条直线段相对于第一条直线段的偏角,即 C 轴弯臂的转角。

如图 5.8 所示,  $P_1$ 、 $P_2$ 、 $P_3$ 、 $P_4$  以及  $R_1$  和  $R_2$  为给定值。以此计算增量管形数据 DBB (Y)、POB (B)、DOB (C), 实现从 XYZ 到 YBC 的坐标转换。

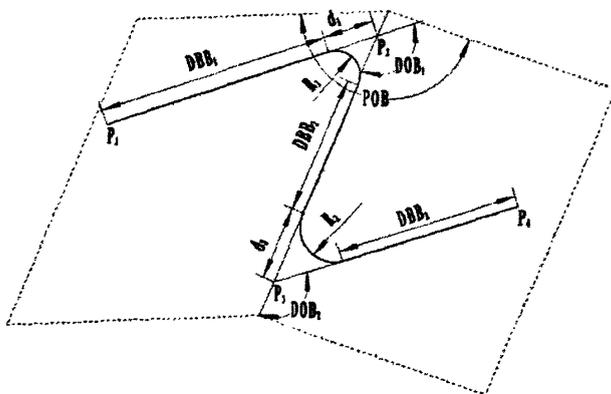


图 5.8 管形参数矢量表示

Fig5.8 Parameters of tube in vector

设坐标分别为  $P_1(x_1, y_1, z_1)$ 、 $P_2(x_2, y_2, z_2)$ 、 $P_3(x_3, y_3, z_3)$ 、 $P_4(x_4, y_4, z_4)$ , 则

根据矢量运算规则<sup>[51]</sup>可以得出:

$$\overline{P_1P_2} \cdot \overline{P_2P_3} = |\overline{P_1P_2}| |\overline{P_2P_3}| \cos DOB_1 \quad (5-1)$$

$$\overline{P_2P_3} \cdot \overline{P_3P_4} = |\overline{P_2P_3}| |\overline{P_3P_4}| \cos DOB_2 \quad (5-2)$$

式中,

$$\begin{aligned} \overline{P_1P_2} &= (x_2 - x_1)\bar{i} + (y_2 - y_1)\bar{j} + (z_2 - z_1)\bar{k} \\ \overline{P_2P_3} &= (x_3 - x_2)\bar{i} + (y_3 - y_2)\bar{j} + (z_3 - z_2)\bar{k} \end{aligned} \quad (5-3)$$

$$\begin{aligned} \overline{P_3P_4} &= (x_4 - x_3)\bar{i} + (y_4 - y_3)\bar{j} + (z_4 - z_3)\bar{k} \\ |\overline{P_1P_2}| &= \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2} \\ |\overline{P_2P_3}| &= \sqrt{(x_3 - x_2)^2 + (y_3 - y_2)^2 + (z_3 - z_2)^2} \end{aligned} \quad (5-4)$$

$$|\overline{P_3P_4}| = \sqrt{(x_4 - x_3)^2 + (y_4 - y_3)^2 + (z_4 - z_3)^2}$$

其中,  $|\overline{P_1P_2}|$ 、 $|\overline{P_2P_3}|$ 、 $|\overline{P_3P_4}|$  分别依次为矢量  $\overline{P_1P_2}$ 、 $\overline{P_2P_3}$ 、 $\overline{P_3P_4}$  的模, 即长度。

所以有:

$$DOB_1 = \arccos \frac{\overline{P_1P_2} \cdot \overline{P_2P_3}}{|\overline{P_1P_2}| |\overline{P_2P_3}|} \quad (5-5)$$

$$= \frac{(x_2 - x_1)(x_3 - x_2) + (y_2 - y_1)(y_3 - y_2) + (z_2 - z_1)(z_3 - z_2)}{\sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2} \sqrt{(x_3 - x_2)^2 + (y_3 - y_2)^2 + (z_3 - z_2)^2}}$$

$$DOB_2 = \arccos \frac{\overline{P_2P_3} \cdot \overline{P_3P_4}}{|\overline{P_2P_3}| |\overline{P_3P_4}|} \quad (5-6)$$

$$= \frac{(x_3 - x_2)(x_4 - x_3) + (y_3 - y_2)(y_4 - y_3) + (z_3 - z_2)(z_4 - z_3)}{\sqrt{(x_3 - x_2)^2 + (y_3 - y_2)^2 + (z_3 - z_2)^2} \sqrt{(x_4 - x_3)^2 + (y_4 - y_3)^2 + (z_4 - z_3)^2}}$$

本弯管系统适用于单模, 所以设图中  $R_1$  和  $R_2$  均为  $R$ ,

所以:

$$\begin{aligned} DBB_1 &= |\overline{P_1P_2}| - R \cos \frac{DOB_1}{2} \\ DBB_2 &= |\overline{P_2P_3}| - R \cos \frac{DOB_1}{2} - R \cos \frac{DOB_2}{2} \\ DBB_3 &= |\overline{P_3P_4}| - R \cos \frac{DOB_2}{2} \end{aligned} \quad (5-7)$$

同理设  $\overline{N}_1$  为  $\overline{P_1P_2}$  和  $\overline{P_2P_3}$  的法矢量、 $\overline{N}_2$  为  $\overline{P_2P_3}$  和  $\overline{P_3P_4}$  的法矢量，

则有，

$$\overline{N}_1 \bullet \overline{N}_2 = |\overline{N}_1| |\overline{N}_2| \cos POB \quad (5-8)$$

$$\text{记 } a_1 = \begin{vmatrix} (y_2 - y_1) & (z_2 - z_1) \\ (y_3 - y_2) & (z_3 - z_2) \end{vmatrix}, \quad b_1 = - \begin{vmatrix} (x_2 - x_1) & (z_2 - z_1) \\ (x_3 - x_2) & (z_3 - z_2) \end{vmatrix}, \quad c_1 = \begin{vmatrix} (x_2 - x_1) & (y_2 - y_1) \\ (x_3 - x_2) & (y_3 - y_2) \end{vmatrix},$$

则有，

$$\begin{aligned} \overline{N}_1 &= \overline{P_1P_2} \times \overline{P_2P_3} = \begin{vmatrix} \bar{i} & \bar{j} & \bar{k} \\ (x_2 - x_1) & (y_2 - y_1) & (z_2 - z_1) \\ (x_3 - x_2) & (y_3 - y_2) & (z_3 - z_2) \end{vmatrix} \\ &= a_1 \bar{i} + b_1 \bar{j} + c_1 \bar{k} \end{aligned} \quad (5-9)$$

$$\text{记 } a_2 = \begin{vmatrix} (y_3 - y_2) & (z_3 - z_2) \\ (y_4 - y_3) & (z_4 - z_3) \end{vmatrix}, \quad b_2 = - \begin{vmatrix} (x_3 - x_2) & (z_3 - z_2) \\ (x_4 - x_3) & (z_4 - z_3) \end{vmatrix}, \quad c_2 = \begin{vmatrix} (x_3 - x_2) & (y_3 - y_2) \\ (x_4 - x_3) & (y_4 - y_3) \end{vmatrix},$$

则有，

$$\begin{aligned} \overline{N}_2 &= \overline{P_2P_3} \times \overline{P_3P_4} = \begin{vmatrix} \bar{i} & \bar{j} & \bar{k} \\ (x_3 - x_2) & (y_3 - y_2) & (z_3 - z_2) \\ (x_4 - x_3) & (y_4 - y_3) & (z_4 - z_3) \end{vmatrix} \\ &= a_2 \bar{i} + b_2 \bar{j} + c_2 \bar{k} \end{aligned} \quad (5-10)$$

所以：

$$\begin{aligned} POB &= \arccos \frac{\overline{N}_1 \bullet \overline{N}_2}{|\overline{N}_1| |\overline{N}_2|} \\ &= \frac{a_1 a_2 + b_1 b_2 + c_1 c_2}{\sqrt{a_1^2 + b_1^2 + c_1^2} \sqrt{a_2^2 + b_2^2 + c_2^2}} \end{aligned} \quad (5-11)$$

最后空间转角的方向由旋向因子  $d$  决定，若  $d \geq 0$  则正转，否则反转。

$$d = \begin{vmatrix} x_4 - x_1 & y_4 - y_1 & z_4 - z_1 \\ x_2 - x_1 & y_2 - y_1 & z_2 - z_1 \\ x_3 - x_1 & y_3 - y_1 & z_3 - z_1 \end{vmatrix} \quad (5-12)$$

由于管件弯曲加工是弹塑性变形过程，在实际加工中，难免会产生弯曲回弹，由此主要会导致管件弯曲角度变小、轴线变长。对弯曲回弹的研究较多，一般采用了经验公式<sup>[57]</sup>、数值分析<sup>[52]</sup>、理论计算<sup>[53]</sup>、有限元仿真<sup>[54][55][56]</sup>等手段，目前

尚处于理论研究阶段，离实际应用还有一段距离。

目前，一般还是用试弯结果对同一批管件进行回弹修正。众多实验证明，弯曲角 $\theta$ 、伸长量 $\Delta L$ 均与成形角 $\theta'$ 之间均呈不过原点的直线关系<sup>[57]</sup>。本系统采用以下两个常用公式对理论计算的增量管形数据进行修正：

$$\theta = K_1\theta' + C_1 \quad (5-13)$$

$$\Delta L = K_2\theta' + C_2 \quad (5-14)$$

式中， $K_1$ 、 $K_2$ 为比例回弹系统， $C_1$ 、 $C_2$ 为固定回弹量。

### 5.3.7 弯管自动加工

本系统采用类似于 G 代码的 NC 指令编程，实现弯管自动加工。由于弯管加工的特殊性，其程序段代码组成中的运动控制功能字和辅助控制功能字与数控切削类的组成有所不同。本数控弯管系统的 NC 指令也由三部份组成：即控制指令码（Y、B、C）、速度指令码（F）及辅助功能码（M），主要指令代码见表 5.1。

表 5.1 主要数控代码指令  
Table 5.1 The main NC coded instructions

代码	指令类型	运动部件	含义
Y	控制指令	小车	送料小车沿 Y 轴增量运动
B	控制指令	夹头	绕 Y 轴空间旋转运动，顺时针为正
C	控制指令	弯曲臂、主轴	绕 Z 轴旋转弯曲，顺时针为正
F	速度指令		加工中，实时改变加工速度
M40	辅助指令	夹紧模(钳口)	夹紧使能
M41	辅助指令		松开使能
M42	辅助指令	导向模	导向模进使能
M43	辅助指令		导向模退使能
M44	辅助指令	随动模	随动模进使能
M45	辅助指令		随动模复位使能
M46	辅助指令	夹头	夹头夹紧使能
M47	辅助指令		夹头松开使能
M48	辅助指令	芯棒缸	芯棒进使能
M49	辅助指令		芯棒退使能

由于弯管加工为点位运动，其中 Y 轴为直线运动，BC 轴为回转运动。回转运动的本质是调用单轴直线运动命令完成而不是采用多轴插补方式完成。与金属切削加工不同，弯管加工所需的数据均为增量型数据，所以不需要标准 G 代码的准备功能字 G01、G02、G03 等，系统默认使用增量坐标。本系统指令代码比较简单、易学易用，所定义的指令代码的具体格式为：

**N\_Y\_B\_C\_M\_F\_EOL**

以上各字段的意义如下：

**N:** 程序段号，后接短整型数据，按照从小到大顺序排列，但可不连续编号；

**Y:** Y 方向地址，后跟送料增量进给数据，正向时“+”可省略，负向时坐标值前加“-”，系统默认单位为 mm；

**B:** B 方向地址，后跟转角增量进给数据，正向时“+”可省略，负向时坐标值前加“-”，系统默认单位为 degree；

**C:** C 方向地址，后跟弯曲增量进给数据，正向时“+”可省略，负向时坐标值前加“-”，系统默认单位为 degree；

**M:** 辅助功能字，后接两位整形数字，用来控制辅助动作，具体定义见上表；

**F:** 弯曲速度修正，后跟速度改变值，默认单位 mm/s 或 degree/s；

**EOL:** 程序行结束标志，即键盘回车，编程时由键盘 Enter 键输入但不显示。

以上指令字有先后顺序、每行语句不必都有，可根据需要按照逻辑分成多行编写。加工程序可以直接在主界面代码编辑区输入、编辑，也可在其他 PC 机上结合具体工艺要求按照规定格式编写并保存为文本文件格式，再通过网络或 USB 等接口将文件直接拷贝到控制器中。

一般弯管加工流程如图 5.9 所示，初始化时，动静机头、弯臂为平行松开状态，随动退到起点状态，芯棒退到位，夹头松开，送料、转角为零位。结合实际工艺编制好相应的数控程序，系统根据程序可以进行译码、控制，完成相应的操作，实现程序段规定的弯管加工过程。

同时，在自动加工中，弯管机需每 50 毫米左右采集一次所有输入点的状态，并以此控制输出，对实时性要求较高。Windows 系统定时器最大分辨率为 55 毫秒，且其消息的优先权太低<sup>[58]</sup>。而多媒体定时器（MultiMedia Timer）的精度非常高，可达 1 毫秒，因此使用多媒体定时器定时中断采集信号可满足实时性要求。

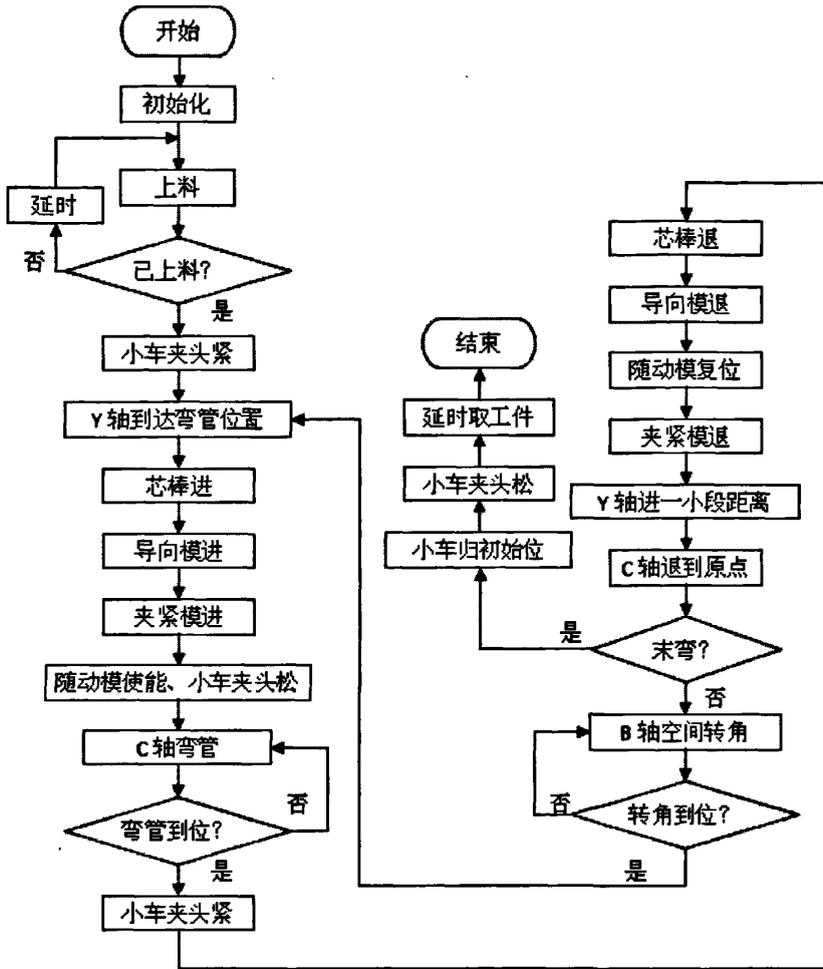


图 5.9 自动加工流程图

Fig5.9 Flow chart of automatic machining

自动加工过程主要是对 NC 编码指令程序的翻译和执行，译码执行部分关键代码如下：

```

for(i=0,i<gCodeNum;i++)
{
    short rtn;
    double data;
    long pos;
    ... ..
    switch(GCode)
    
```

```
case 'Y'://Y 轴运动
    y_data = guccard.Getdata(&data);
    GetAtlPos(1, & pos);
    AxisMove(1, pos + y_data); break;
case 'B':// B 轴运动
    ... ..
case 'C':// C 轴运动
    ... ..
case 'F'://改变速度
    vel_data = guccard.Getdata(&data);
    ModifyVel(vel_data);
case 'M': //辅助代码处理
{
    m_data = (int)guccard. Getdata(&data );
    switch(m_data)
    {
        case 40:
            rtn=guccard.OpenPort(1, true);break;//钳口加紧
        case 41:
            rtn=guccard.OpenPort(2,true);break;//钳口放松
            ... ..
    }
}
}
```

### 5.3.8 手动调整

手动调整模块主要用来快速精确调整机床坐标轴的位置，有两种控制方式：点动和连续运动。点动时，鼠标左键单击按钮后，坐标轴按照指定的速度运行一定的距离或角度，到达目前位置后坐标轴停止运动；连续运动时，鼠标左键按下

按钮不放，坐标轴一直运动，直到限位或松开鼠标左键，鼠标松开后坐标轴立即停止运动。可以通过是否勾选点动按钮来选择控制方式。

该模块的实现主要是通过通过在界面右侧客户区的视类中重载虚拟函数 `PreTranslateMessage(MSG* pMsg)` 实现的。`PreTranslateMessage(MSG* pMsg)` 是消息在送给 `TranslateMessage` 或 `DispatchMessage` 函数之前被调用的，可以对本窗口大多数消息进行处理。鼠标和按钮消息均可以在此处处理。设计原理是，若鼠标点击在 Y、B、C 按钮区内，则对其消息响应，完成相应的调整运动控制；若不在按钮区内，则鼠标消息按正常路径传递和处理。

以下为点动和连续运动的部分代码（Y 轴正向）：

```
PreTranslateMessage(MSG* pMsg) //手动调整控制程序
{
    if(m_bJogStatus) //精调，点动， m_bJogStatus 为点动按钮成员变量
    {
        //Y 轴正方向
        if(pMsg->message==WM_LBUTTONDOWN &&
            pMsg->hwnd==GetDlgItem(IDC_BTN_YP)->m_hWnd)
        {
            long pos;
            GetAtlPos(1, &pos); // 获取当前实际位置，Y 轴为 1 号轴
            AxisMove(1, pos + m_fJogStepY); //向正方向运动 m_fJogStepY
        }
        ... ..
    }
    else //粗调，快速连续运动
    {
        long add=5000000; //很大数值，表脉冲数，超过行程
        //Y 轴正向按钮按下，轴开始运动
        if(pMsg->message==WM_LBUTTONDOWN &&
            pMsg->hwnd==GetDlgItem(IDC_BTN_YP)->m_hWnd)
        {
            long pos;
```

```

        GetAtIPos(1,&pos);
        AxisMove(1, pos + add);//一直向前运动
    }
    //Y 轴正向按钮弹起, 轴立即停止运动
    if(pMsg->message==WM_LBUTTONDOWN &&
        pMsg->hwnd==GetDlgItem(IDC_BTN_YP)->m_hWnd)
    {
        EStpMtn();//急停
    }
    ... ..
}
return CFormView::PreTranslateMessage(pMsg);
}

```

### 5.3.9 系统监控

系统监控模块由坐标显示、故障诊断和动态仿真三个部分组成。由于作者时间和精力有限, 前两部分已经完成, 动态仿真将由其他人员继续完成。

#### 1、坐标显示

由于系统自动加工时是独立开辟子线程运行, 而在手动调整时又没有太多消息要处理, 同时, 坐标显示并不要求很高的实时性, 所以利用 Windows 的系统定时器实现运动坐标的动态显示可满足应用要求。

使用系统定时器需要用到 `SetTimer`, `OnTimer` 和 `KillTimer` 三个函数。本系统在系统回零后, 开始调用 `SetTimer` 创建定时器, 并在 `WM_TIMER` 消息响应函数 `OnTimer` 中添加坐标显示代码, 在退出前调用 `KillTimer` 将其取消。

`WM_TIMER` 消息响应函数 `OnTimer` 的部分主要代码如下:

```

OnTimer(UINT nIDEvent)
{
    long pos[3];
    GetEncPos(1,&pos[1]);//读 Y 光栅(辅助)
}

```

```

GetAtIPos(2,&pos[2]);// 读 B 编码器
GetEncPos(3,&pos[3]);//读 C 编码器(辅助)
m_YMach=(double)(pos[1]*m_YPPM);//将脉冲信号转换为 Y 轴绝对坐标
m_BMach=(double)(pos[2]*m_BPPD);//将脉冲信号转换为 B 轴绝对坐标
m_CMach=(double)(pos[3]*m_CPPD);//将脉冲信号转换为 C 轴绝对坐标
m_Y= m_YMach - m_fYOffset;//Y 绝对坐标->相对坐标
m_B= m_BMach - m_fBOffset;//B 绝对坐标->相对坐标
m_C= m_CMach - m_fCOffset;//C 绝对坐标->相对坐标
... ..
UpdateData(FALSE);//显示数据
CFormView::OnTimer(nIDEvent);
}

```

## 2、故障诊断

在生产过程中，产生故障是难免的。弯管机控制系统中，主要是电气和液压两部分容易发生故障，因此本系统设计了针对坐标轴和辅助动作的故障诊断模块，通过读入并显示各状态对应的 I/O 口信号实现。同时设计了友好的对话框故障显示界面，如图 5.10 所示。其实现方法与坐标显示部分相似，不再赘述。



图 5.10 故障诊断对话框

Fig5.10 The dialog of fault diagnosis

## 5.4 系统测试

由于软件尚未完全开发完毕，目前仅对已完成部分进行了简单的功能测试。

系统文件新建、打开、保存及编辑等功能正确，使用正常，如图 5.3，为编辑后文件保存；参数设置功能可以达到应用要求，如回零点、伺服参数设置分别如 5.4、5.5 所示，参数可以正常保存、修改，实现初始化等；坐标系建立、坐标转换、手动调整、系统监控功能正常；自动加工基本可以实现，运动控制逻辑正确，但目前效率较低，需进一步改进。

## 5.5 本章小结

本章主要介绍软件系统的实现。首先对所选用软件开发平台，Windows XP 系统、C++编程语言及 VC++6.0 集成开发环境进行了介绍。接着以面向对象、模块化设计等先进软件工程设计思想设计并基本实现了控制系统各功能模块并给出部分关键程序。

## 第六章 总结与展望

### 6.1 全文总结

基于 PC 的开放式数控已成为当今国内外数控系统的发展趋势。鉴于目前常见数控弯管机控制系统的不足,本文首次提出基于嵌入式运动控制器来开发一套功能强、性能稳定、体积小、价格合适的数控弯管控制系统。并根据弯管加工的实际需求,完成相关软、硬件系统设计和软件开发。本文主要完成以下工作:

1) 对多种传统弯管工艺和弯管新工艺以及国内外数控弯管机的发展状况进行了归纳和总结。分析各弯管工艺特点,确定开发适用于绕弯工艺的数控弯管控制系统。并根据数控绕弯管机的结构组成及工作原理,提出系统控制要求。

2) 对目前常见数控弯管机控制系统进行深入研究,分析其各自特点,指出他们的不足。结合当前数控系统的发展趋势,首次开创性地提出以嵌入式运动控制器为控制核心,在此基础上开发具有高精度、高效率、高稳定性的开放式数控弯管控制系统。

3) 根据弯管加工的运动特点及控制系统功能需求,选择合适的运动控制器、人机交互界面及交流伺服驱动等硬件设备,构建硬件系统。分析系统存在的干扰并提出合理的抗干扰措施,保证系统可靠运行。

4) 基于 Windows 操作系统平台,利用 VC++6.0 开发了基于单文档的软件系统,基本实现文件管理、系统设置、数控加工等各软件功能模块。整个系统人机交互友好、操作方便,具有开放性,可扩展性好,可靠性高。

### 6.2 研究展望

本文以嵌入式运动控制器为核心开发的开放式数控弯管控制系统,结构紧凑、易于维护和升级,具有较高的实用价值,值得进一步深入研究。由于时间关系,加工动态仿真部分暂未实现,系统还需进一步完善。

管材弯曲成形是一个复杂的弹塑性变形过程。在弯管过程中,管材弯曲部位复杂的应力、应变变化会导致管壁产生裂纹、起皱、横截面畸变等多种缺陷。这

给开发高精度、高效率、高稳定性的数控弯管控制系统带来了一定的难度。结合课题完成情况与目前弯管成形技术的发展现状,后续研究和开发可从以下几个方面进行:

1. 采用多线程编程技术,目前靠读程序代码临时保存后直接翻译执行自动加工程序,会导致系统占用率高、效率较低,应为自动加工开辟一个独立的子线程处理加工程序,以提高效率;

2. 弯管回弹研究,对弯曲回弹进行深入研究,借助仿真、数值模拟等手段获取符合实际的回弹系数,对弯管加工数据进行有效补偿,从而节省因试弯而浪费的资源;

3. 图形化设计、加工显示及自动编程,如对 AutoCAD 进行二次开发,将其绘图功能与系统结合,实现设计加工一体化,可将所设计的管件图形数据自动转变为加工所需的增量数据并实现自动编程;

4. 加工动态仿真,可以利用开放的图形程序接口 OpenGL 开发三维仿真系统,其独立于窗口系统和操作系统,可以与 Visual C++ 紧密连接,从而对加工程序进行仿真运行,检测有无干涉,完善加工工艺;

5. 语音功能,可在系统中加入包括引导提示、故障报警等语音功能。

## 参考文献

- [1] 杨合,孙志超,林艳等.管成形技术发展基础问题研究[J].塑性工程学报.2001(2):83-85
- [2] 王同海.管材塑性加工技术[M].北京:机械工业出版社,1998
- [3] 温彤.管材成形技术综述[J].机械设计与制造.2006(11):77-79
- [4] 张新华,鲁志康,赵建跃.PLC应用于油循环系统一例[J].机械制造.2001(5):29-31
- [5] 赵臻淞,杨合,林艳,詹梅.管材弯曲工艺研究新进展[J].金属成形工艺.2002(2):1-7
- [6] 唐长平.数控弯管机的研究与开发[D].合肥:合肥工业大学,2002
- [7] 夏东强.管材弯曲成形技术研究[D].重庆:重庆大学,2008
- [8] Peter Gantner, Herbert Bauer, David K. Harrison, Anjali K.M. De Silva.  
Free-Bending—A new bending technique in the hydroforming process chain[J].  
Journal of Materials Processing Technology.2005(167):302-308
- [9] 田福祥,王珍.管材弯曲加工新技术[J].锻压机械.2002(3):32-35.
- [10] 胡忠.中频感应局部加热弯管工艺的研究[J].塑性工程学报.1996(4):48-56
- [11] 王志强,刘晓飞.管和板的热应力弯曲工艺[J].塑性工程学报.2000,7(2):55-57
- [12] 陈敦军,向毅斌,吴诗.激光成形工艺方法及其发展前景[J].热加工工艺.2000(3):50-51
- [13] 方刚.激光弯曲成形技术的特点及其应用[J].应用激光.2001,21(2):106-109
- [14] 王续跃,陶春华,许卫星,徐云飞,吴东江.金属管材激光弯曲成形的扫描路径规划[J].  
中国激光.2008(11):1813-1820
- [15] 杨学桐,李冬茹,何文立等.21世纪数控机床技术发展战略研究[M].北京:国家机械工业局,2000
- [16] 武世勇,石伟,刘庄.缠绕式弯管工艺对管壁厚度影响的数值分析[J].锻压技术.2002(1):35-38
- [17] 马春敏,康存锋,黄旭东,吴洁,费仁元.数控弯管机加工工艺规划的研究[J].制造技术与机床.2009(1):21-24
- [18] 国家机械工业局.中华人民共和国机械行业标准—数控弯管机技术条件 JB/T 5761.1—1999.北京:机械工业部机械标准化研究所,1999
- [19] 胡俊,王宇晗,吴祖育等.数控技术的现状和发展趋势[J].机械工程师.2000(3):5-7
- [20] 林莹,王呈方.单片机在弯管机弯曲角成形中的应用[J].微型机与应用.1996(8):32-34

- [21]徐玉斌, 张井岗. 单片机在数控弯管机中的应用[J]. 电子器件. 1997, 20(1):467-470
- [22]曾和兰. PLC 在弯管机控制中的应用[J]. 长春工业大学学报. 2004, 25(3):59-61
- [23]骆经备. 基于 PLC 与步进电机的自动弯管机设计[J]. 机电工程. 2006(8):39-41
- [24]许昌, 魏艳红, 祝铭尉. 基于三菱运动控制单元的弯管机控制系统设计[J]. 自动化仪表. 2008(10):33-36
- [25]熊晓红, 杨泽发, 李从心. 数控弯管机控制系统[J]. 机械与电子. 1995(1):12-14
- [26]杨泽发, 熊晓红, 李从心, 王运赣. 数控弯管机数字式电液闭环控制系统[J]. 计算机与现代化. 1994(1):19-23
- [27]杨旭东, 王永军, 孙凌逸, 王俊彪. 基于 PLC 的拉弯机控制系统设计[J]. 机床与液压. 2004(1):12-14
- [28]齐善东. 激光冲击成形控制系统的研究[D]. 镇江:江苏大学, 2009
- [29]周祖德, 魏仁选, 陈幼平. 开放式控制系统的现状、趋势与对策[J]. 中国机械工程. 1999(10):1090-1093
- [30]罗炳军, 陈健, 樊亚妮. 基于运动控制器的开放式运动控制系统研究与应用[J]. 工业仪表与自动化装置. 2006(3):10-11, 21
- [31]龙云云, 李超, 丁有和, 房义军. 快速点磨削成形机开放式数控系统的研究与开发[J]. 南京师范大学学报. 2006(4):83-86
- [32]杨晓京, 任伟. 开放式数控系统硬件平台的构建[J]. 机床与液压. 2003(06):67-69
- [33]杨虎. 弯管机专用数控系统的开发[D]. 武汉:华中科技大学, 2007
- [34]黄小刚. 智能数控弯管装备控制系统开发[D]. 成都:电子科技大学, 2008
- [35]李克彬. 三维数控弯管机的研究与开发[J]. 轻工机械. 2008, 26(3):33-36
- [36]文怀兴, 夏田. 数控机床系统设计[M]. 北京:化学工业出版社, 2005
- [37]杨仁宇. S0PC 技术在运动控制器中的应用研究[D]. 镇江:江苏大学, 2009
- [38]深圳固高科技. GUC 系列运动控制器用户手册[M]. 深圳:固高科技, 2006
- [39]李恩光. 机电伺服控制技术[M]. 上海:东华大学出版社, 2003
- [40]巫付专, 王晓雷. 控制电机及其应用[M]. 北京:电子工业出版社, 2008
- [41]Panasonic. Technical reference AC Servo Motor& Driver MINAS A4-series.  
[http://industrial.panasonic.com./ww/i\\_e/25000/motor\\_fa\\_e/motor\\_fa\\_e.html](http://industrial.panasonic.com./ww/i_e/25000/motor_fa_e/motor_fa_e.html)
- [42]陈向群. Windows 操作系统原理[M]. 第二版. 北京:机械工业出版社, 2004
- [43]孙鑫, 余安萍. VC++深入详解[M]. 北京:电子工业出版社, 2006

- [44](美)Delores M. Etter, Jeanine A. Ingber. Engineering problem solving with C++[M]. 北京:清华大学出版社, 2004
- [45]吕凤翥. C++语言程序设计[M]. 北京:电子工业出版社, 2001
- [46]付灵丽, 柴欣. Visual C++ 程序设计基础[M]. 北京:中国铁道出版社, 2004
- [47]王育坚. Visual C++面向对象编程教程[M]. 第二版. 北京:清华大学出版社, 2007
- [48]深圳固高科技. GUC 系列运动控制器编程手册[M]. 深圳:固高科技, 2006
- [49]罗志猛, 柴苍修, 冯晓娟等. 数控弯管的空间转角数据转换算法[J]. 机电产品开发与创新. 2005(9):124-125
- [50]余道洋, 韩江, 夏铨等. 空间管件数学模型的建立和数据信息转换计算[J]. 合肥工业大学学报. 2004(10):1242-1245
- [51]杨文茂, 李全英. 空间解析几何[M]. 第二版. 湖北:武汉大学出版社, 2006
- [52]Mei Zhan, He Yang, Liang Huang. Springback analysis of numerical control bending of thin-walled tube using numerical-analytic method[J]. Journal of Materials Processing Technology. 2006(177):197-201
- [53]R. J. Gu, H. Yang, M. Zhan. Research on the springback of thin-walled tube NC bending based on the numerical simulation of the whole process[J]. Computational Materials Science. 2008(42):537-549
- [54]Hokook Lee, C. J. Van Tyne, David Field. Finite element bending analysis of oval tubes using rotarydraw bender for hydroforming applications[J]. Journal of Materials Processing Technology. 2005(168):327-335
- [55]Jun Zeng, Zhaoheng Liu, Henri Champlaud. FEM dynamic simulation and analysis of the roll-bending process for forming a conical tube[J]. Journal of materials processing technology. 2008(198):330-343
- [56]S. Baudin, P. Ray, B. J. Mac Donald, M. S. J. Hashmi. Development of a novel method of tube bending using finite element simulation[J]. Journal of Materials Processing Technology. 2004(153-154):128-133
- [57]胡勇, 王呈方. 弯管工艺中回弹、伸长和成形半径的确定方法[J]. 锻压机械, 1997(1):35-37
- [58]陆星刚, 张雨飞. 数控弯管机实时控制程序的开发[J]. 工业控制计算机. 2002(15):15-16

## 致 谢

首先，感谢母校—江苏大学对我七年的教育与培养！

本文是在导师殷苏民教授的悉心指导下完成的。在学习期间，导师在学业和生活上都给了我极大的关怀和照顾，为我提供了良好的科研学习环境，创造了良好的科研条件。导师渊博的学识、严谨求实的治学态度、锐意进取的科研品德以及授人以渔的教学方式使我在知识、能力以及身心素养等方面都有长足的进步。本文从选题到修改成文的全过程的都凝聚了导师的大量心血，在此向精心培养和教育我的殷老师表示衷心的感谢！

感谢凌智勇老师在课题中给予的帮助，同时感谢他对研机电 07 班全体同学的关心和照顾，正因为凌老师的关怀才有了一个团结向上的班集体。在此向凌老师表示诚挚的谢意。

在日常的学习和生活中，我得到了师兄齐善东、杨仁宇，同窗好友宁吉平、陆焱焱、谭海波、董晓明、冯培培、吴缙等，以及师妹周青、师弟张平和高瑞强等人的关心和帮助，向他们表示真挚的感谢！

同时，本论文受益于所有参考文献作者的劳动成果，在此，向他们表示感谢！

此外，还要感谢养育我的父母和关心我的家人，是他们对我无私的奉献和殷切的关怀，才使我能够安心顺利完成学业。

最后，感谢答辩委员会各位专家参加我的论文答辩！

## 攻读硕士学位期间发表的论文

- [1] 殷苏民, 唐学峰, 陆焱焱, 谭海波. 新型数控弯管机控制系统设计. 机械设计与制造, 已录用
- [2] 殷苏民, 陆焱焱, 谭海波, 唐学峰. 心肺复苏模拟人控制系统的设计. 传感器与微系统, 已录用