

陶瓷零件快速成型机数控系统的设计研究

摘要

本论文课题是在基于石蜡速凝特性的层合速凝快速成型技术理论基础上，开发出能够应用于陶瓷零件快速成型领域的快速成型机数控系统，以满足陶瓷零件快成型的经济性、实用性要求。

本文对应用于陶瓷零件快速成型领域的快速原型技术的现状进行了分析，介绍了基于石蜡速凝特性的层合速凝快速成型技术的基本理论思想。研究分析了陶瓷零件快速机的整机机械系统，重点分析了铺料机械系统，对重要零部件进行了选取校核。运用 PRO/E 对铺料机械系统进行了虚拟装配，并对该系统进行了运动学仿真分析。

在比较分析几种开放式数控系统的基础上，结合陶瓷零件快速成型机的控制要求，提出“IPC+PMAC”的控制方案，配以交流伺服控制系统，搭建了陶瓷零件快速成型机的控制系统。对系统电气驱动部件如主轴变频器、交流伺服驱动器、交流伺服电机等进行了计算选取，设计完成了硬件系统连接图。

交流伺服系统的控制性能很大程度上影响了零件的加工精度，因此，本文建立了交流伺服控制系统的数学模型，在经典控制理论的基础上，运用 Matlab/SIMULINK 对进给交流伺服控制系统进行了 PID 仿真分析，得出了系统的响应曲线，并分析得出了系统的稳态误差。为了使系统得到更好的性能，利用 PEWIN 软件对系统进行了调试仿真。

本文搭建了陶瓷零件快速成型机的数控系统软件部分，采用模块化的设计思路，对程序的上载和下载，系统的 PMAC 插补模块，PMAC 的 PLC，和数据采集分别作了分析。

采用基于石蜡速凝特性的层合速凝快速成型技术的方法进行了制备陶瓷零件实验，从而对该技术进行了实验验证。

本论文对于新型陶瓷零件快速成型设备的研究开发以及推动陶瓷零件快速成型的产业化有着重要的意义和一定的实用价值。

关键词：陶瓷零件快速成型，数控系统，PMAC 卡，PID

NUMERICAL CONTROL SYSTEM OF RAPID PROTOTYPING MANUFACTURING MACHINE TOOL FOR CERAMIC PARTS

ABSTRACT

This thesis focuses on the development of an numerical control system for the machine tool applied in the filed of prototyping ceramic parts, based on the technology theory of RPM for ceramic parts which was based on the quick solidification of wax, the purpose of which was to meet the need of economics and practicalities of the present RPM for ceramic parts.

The situation of RPM technologies which were applied in the filed of prototyping ceramic parts was analyzed and the basic theory concept of RPM for ceramic parts based on the quick solidification of wax was also introduced in the thesis. The machine tool mechanical system of the machine tool about rapid prototyping manufacturing for ceramic parts was analyzed, paving slurry mechanical system was mainly analyzed, the important parts and components of which were selected and verified. Paving slurry mechanical system was assembled virtually in PRO/E software environment, kinematics simulation analysis of which was also done.

At the basic of comparing several open nunberical systems, combined with control requirements of the machine tool about rapid prototyping manufacturing for ceramic parts, "IPC+PMAC" control system plan was raised which was equipped AC servo system to construct control system. Electrical components, such as spindle frequency converters, AC servo driver, and AC servo motor were calculated and chosed. completed the design of hardware system cording diagram.

Because machining precision was influenced largely by control performance of AC servo system, mathematical model of AC servo

control system was constructed. On the basis of classical control theory, PID simulation analysis of AC servo control system was done, response curve and steady state error of control system were gained. In order to make the system have better performance, the control system was debugged by PEWIN software.

Numerical system software of the machine tool about rapid prototyping manufacturing for ceramic parts was established, adopted modularization design; procedures upload and download, system PMAC interpolation module, PLC of PMAC and data acquisition were analyzed separately.

The experiment of ceramic parts preparation was operated by adopting the method of based on the technology theory of RPM for ceramic parts which was based on the quick solidification of wax, the experiment provided support for the above-mentioned technology.

It had important meaning and certain utility value for the development of the device of new type ceramic part RPM and the industrialization of rapid prototyping ceramic parts.

KEY WORDS: rapid prototyping ceramic parts, numerical system, PMAC card, PID

原创性声明及关于学位论文使用授权的声明

原创性声明

本人郑重声明：所呈交的学位论文，是本人在导师的指导下，独立进行研究所取得的成果。除文中已经注明引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的科研成果。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责任由本人承担。

论文作者签名：田振玉 日期：2009年5月

关于学位论文使用授权的声明

本人完全了解陕西科技大学有关保留、使用学位论文的规定，同意学校保留或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；本人授权陕西科技大学可以将本学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或其他复制手段保存论文和汇编本学位论文。同时授权中国科学技术信息研究所将本学位论文收录到《中国学位论文全文数据库》，并通过网络向社会公众提供信息服务。

(保密论文在解密后应遵守此规定)

论文作者签名：田振玉 导师签名：高东峰 日期：2009年5月

1 绪论

1.1 快速原型制造技术的概念及原理

快速成型技术(rapid prototyping manufacturing, RP&RPM)是20世纪80年代后期发展起来的一项先进制造技术^[1]。其可以直接根据产品设计数据或快速测量(直接测量或间接测量)数据,快速制造出新产品的样件、模具或模型,大大缩短了加工周期并降低了产品研制的成本,对促进企业产品创新、提高产品竞争力有积极的推动作用。众所周知,21世纪是以知识经济的时代,制造业面临着生产周期缩短,小批量,产品复杂多样的严峻挑战。在制造业日趋国际化的状况下,缩短产品开发周期和减少开发新产品的投资风险,提高产品的生产效率,成为企业赖以生存的关键。直接从计算机模型产生三维物体的快速成型技术,是由现代设计和现代制造技术迅速发展的需求应运而生的,它大大缩短了制造产品的时间和降低了生产成本^[2]。制造出的零件可以被用于分析其主要性能和理论功能,或者作为功能原件直接应用于制造过程^[3],已涉及机械工程、自动控制、激光、计算机、材料等多个学科。快速原型制造技术将计算机辅助设计与制造(CAD&CAM)、精密伺服驱动、计算机数控(CNC)、激光技术及材料科学等先进技术集于一体,符合现代先进制造的发展趋势。此外,应用于快速原型制造的材料种类也日益增多,从而提高了产品的精度和功能特性^{[4][5]}。近年来,该技术迅速在工业造型、制造、建筑、艺术、医学、航空、航天等领域得到良好的应用。快速成型技术为企业提高竞争力提供了一种先进的手段。

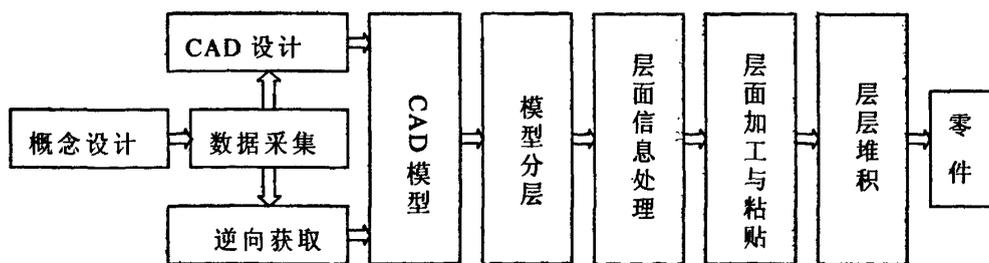


图 1-1 快速原型制造技术原理

Fig.1-1 Principle of RPM

快速原型制造技术的成型原理突破了传统加工中的成型法(如锻压、冲压、拉伸、铸造、注塑加工)和切削加工的工艺方法,其本质是用积分法制造三维

实体。尽管它可以用多种工艺方法来实现，但各种方法的基本原理都是一样的，都是基于离散/堆积的成型思想，其技术原理图如图 1-1 所示。

设计人员可以应用各种三维 CAD 造型系统，包括 Solidworks、Solidage、UG、Pro/E 等进行三维实体造型，将设计人员所构思的零件概念模型转换为三维 CAD 数据模型。也可通过三坐标测量仪、激光扫描仪、核磁共振图像、实体影象等方法对三维实体进行反求，获取三维数据，以此建立实体的 CAD 模型^[6]。然后，通过三维造型系统将零件 CAD 数据模型转换成一种可被快速成形系统所能接受的数据文件，如 STL、IGES 等格式文件。因 STL 格式文件易于进行分层切片处理，故目前绝大多数快速成形系统采用 STL 格式文件。在把三维模型转换成 STL 格式文件以后，就可以进行分层。当然，也可直接由 CAD 数据模型中切出一系列层片轮廓数据作为成型输入数据。在生成层片数据信息以后，快速成形系统根据切片的轮廓和要求，用片材、丝材、粉末材料等制成所要求的薄片，通过一片片的堆积，最终完成三维实体原型的制备。

1.2 快速原型制造技术的特点

快速原型制造技术由于其设计、工艺以及材料方面的特殊性，使其具有下面的特点：

快速原型制造技术的特点如下：

(1) 制造快速

快速原型制造技术是并行工程中进行复杂原型和零件制作的有效手段。从产品 CAD 或从实体反求获得数据到制成原型，一般只需要几小时至几十个小时，速度比传统成型加工方法快得多。这一新技术尤其适合于新产品的开发，适合小批量、复杂（如凹槽、凸肩、空心 and 嵌套等）异形产品的直接生产而且不受产品形状复杂程度的限制。新技术改善了设计过程中的人机交流，使产品设计和模具生产并行，从而缩短了产品设计、开发的周期，加快了产品更新换代的速度，大大地降低了新产品的开发成本和企业研制新产品的风险^[7]。

随着互联网的发展，快速原型制造技术也更加便于远程制造服务。由于互联网便捷的数据传输缩短了用户和制造商之间的距离，利用互联网就可以进行远程设计和远程制造服务，能使有限的资源得到充分的利用，用户的需求也可以得到最快的响应。

(2) 技术高度集成

落后的计算机辅助设计工艺规划（Computer Aided Process Planning, CAPP）一直是实现设计与制造一体化较难克服的一个障碍。快速原型制造技

术是计算机技术、数据采集与处理技术、材料工程和机电加工与控制技术的综合体现。只有在这些高新技术迅速发展的今天才可能使 CAD 和 CAM 很好地结合, 实现设计与制造一体化^[8]。

(3) 自由成型制造

自由成型的含义有两个: 一是指可以根据原型或零件的形状, 无需使用工具、模具, 而自由地成型, 由此大大缩短新产品的研制时间并节省工具或样件模具费用; 二是指不受形状复杂程度限制, 能够制造任意复杂形状与结构、不同材料复合的原型或零件^[9]。

(4) 制造过程高柔度性

共同的制造原理使快速原型制造系统在软件和硬件的实现上 70~80% 是相同的, 也就是在一个现有的系统上仅增加 20~30% 的元器件和软件功能就可进行另一种制造工艺。不同工艺原理的设备容易实现模块化, 可相互切换; 对于整个制造过程, 仅需改变 CAD 模型或反求数据结构模型, 更新调整和设置参数即可生产出不同形状的原型或零件, 还能借助电铸、电弧喷涂等技术进一步将塑胶原型制成金属模具。

(5) 可选材料的广泛性

快速原型制造技术可以采用的材料十分广泛, 如可以采用树脂类、塑料类原料, 纸类、石蜡类原料, 也可采用复合材料、金属材料或陶瓷材料的粉末、箔、丝、小块体等, 也可以是涂覆某种粘结剂的颗粒、板、薄膜等材料。

(6) 广泛的应用领域

除了制造原型外, 这项技术也特别适合于新产品开发、快速单件及小批量零件制造、不规则零件或复杂形状零件的制造、模具及模型设计与制造、外形设计检查、装配检验、快速反求与复制, 也适合于难加工材料的制造等。这项技术不仅在制造业的产品造型与模具设计领域, 而且在材料科学与工程、工业设计、医学科学、文化艺术、建筑工程等领域有广阔的应用前景。

(7) 突出的技术经济效益

新技术制得零件的复杂程度和生产批量与原型或零件的制造成本基本无关, 也降低了小批量产品的生产周期和成本, 这有利于把握商机, 考虑新颖、复杂甚至是以往认为没有效益的制造要求。快速原型制造属于非接触加工, 不需要机床切削加工所必需的刀具和夹具, 避免了刀具磨损和切削力影响。制造过程无振动、噪声, 没有或极少下脚料, 是一种环保型制造技术。同时, 这一技术也减少了对熟练技术工人的需求^[10]。

1.3 快速原型制造技术在陶瓷领域的应用

先进陶瓷（也称高性能陶瓷）以其特有的轻质、高强度、耐高温、抗氧化、耐腐蚀和功能性等一系列优异的特性，成为航空、航天、能源、机械、电子信息、生物工程等高新技术的重要组成部分和不可缺少的物质基础。因此，先进陶瓷材料已成为各国科学家、政府及产业部门研究的重点之一。然而近二十年来，高性能陶瓷的产业化进展缓慢，这有许多原因，其中，陶瓷材料的制备工艺是关键因素之一。人们已经认识到陶瓷材料制备工艺是降低陶瓷制品生产成本、提高陶瓷材料可靠性和可重复性不能逾越的环节。新的陶瓷粉体的制备工艺、成型工艺及烧结工艺的研究逐渐成为陶瓷材料研究领域的重点，其中陶瓷材料成型工艺的研究已逐渐成为陶瓷制备工艺科学研究的主流。研究表明，陶瓷制品的成型是材料设计和材料配方实现的前提，在材料的制备工艺中起着承上启下的作用，因而，它是限制高性能陶瓷产业化的主要问题之一。

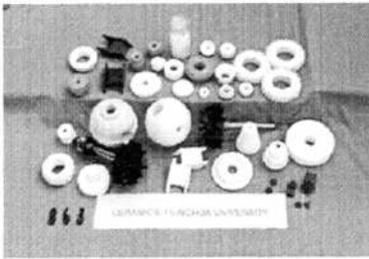


图 1-2 胶态注模陶瓷制件
Fig1-2 Gel Casting model



图 1-3 SLA 制件
Fig1-3 SLA model

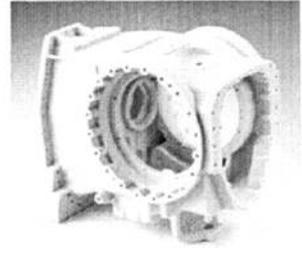


图 1-6 3D 打印模型
Fig1-6 3D model

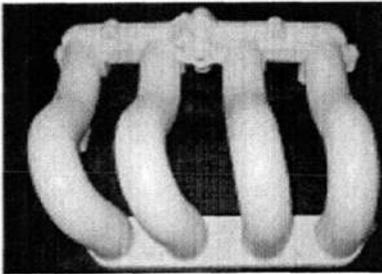


图 1-4 SLS 制件
Fig 1-4 SLS model

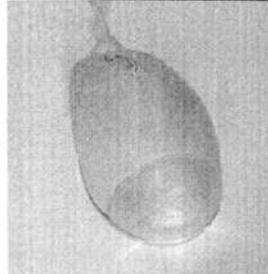


图 1-5 FDM 鼠标模型
Fig 1-5 FDM model

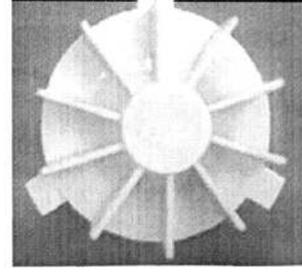


图 1-7 LOM 模型
Fig 1-7 LOM model

近年来人们将发展传统陶瓷成型方法和开发新型陶瓷成型技术作为研究重点，各种新型成型技术不断涌现，其中典型的一类就是陶瓷的胶态成型技术。陶瓷胶态成型是高分散陶瓷悬浮体的湿法成型，与干法成型相比，它可以有效控制团聚，减少缺陷。但是，应该看到传统的胶态成型也存在一定的缺点，如注浆成型、压滤成型形成的坯体存在着密度梯度和不均匀性。注射成型虽然有

助于提高坯体密度和均匀性，但是有机物的加入容易导致开裂等缺陷^[11]。

为克服传统胶态成型技术的缺点，近年来各种新型胶态成型技术不断涌现。其中，较为典型的有流延法成型（Tape Casting）^[12]、凝胶注模成型（Gel Casting）^[13]，直接凝固成型（Direct Coagulation Casting）等^[16]方法。国内清华大学陶瓷精细成型国家重点实验室的黄勇等在胶态成型方面研究较为深入，曾系统研究过直接凝固成型、凝胶注模成型等方法在制备 α - Al_2O_3 、 ZrO_2 、 SiC 等材料方面的应用^[17-18]（成型的陶瓷制件如图1-2所示）。

然而，无论是新型胶态成型方法，还是传统胶态成型以及干法成型等方法，都没有摆脱模具对陶瓷生产的制约，这种状况显然无法满足日益激烈的市场竞争、日益缩短的产品更新周期和频繁的产品试制和改型。固体无模成型（Solid Freeform Fabrication, SFF）的出现则很好地解决了模具的问题。

无模成型实际上是快速原型制造技术（Rapid Prototyping Technology, RP）在陶瓷制造技术上的应用。由于快速原型制造技术借助于计算机辅助设计，或用实体反求方法采集得到有关原型或零件的几何形状、结构和材料的组合信息，从而获得目标原型的概念，并以此建立数字化模型，之后将这些信息输出到计算机控制的机电集成制造系统，通过逐点、逐面进行材料的“三维堆砌”成型，再经过必要的处理，使其在外观、强度和性能等方面达到设计要求，从而达到快速、准确地制造原型或实际制件、部件，目前其发展趋势之一是结合陶瓷制造技术用于陶瓷制件的制造。

1.4 国内外研究现状

快速成型技术的提出始于 80 年代末，经过十几年的努力，快速原型技术在上世界上得到了很大的发展^[19]。国外 RP 技术的研究和应用主要集中在美国、欧洲和日本。从技术、材料、应用和设备等方面来看，美国领先于欧洲和日本，欧洲和日本平分秋色。目前，世界上已有 200 多家机构开展了 RP 的研究^[20]。

1984 年，作为 RP 技术之一的快速光造型技术尚处于实验室研究阶段。1987 年，拥有这项专利技术的美国 3DSYSTEMS 公司首先推出了快速成型设备 SLA-1，引起了世界的轰动。1988 年 6 月，该产品成为世界上第一种商品化的 RP 系统。1989 年初第二代快速成型机 LSA-250 又被开发出来，次年又推出了 LSA-500，容积不断增大，激光功率不断提高。与此同时，日本三菱商事株式会社也开始了这项技术的研究，并成立了 CMET 公司，先后推出的产品有 SOUP(Solid Object Ultraviolet Laser Plotter)600、850、530、400、1000 等多种。德国、英国等国也对 RP 工艺和系统进行了研究开发，取得了显著的效果^[21]。到 1991

年, 已有 16 种不同的应用系统问世, 其中至少有 10 种商品化。到 1994 年, 已有 891 套 RP 系统在 29 个国家使用, 有近 20 家公司生产 RP 系统, 年销售量 336 台; 用 RP 系统进行服务的机构有 155 家(其中美国有 96 家, 欧洲有 40 家); 有 35 家机构从事 RP 系统的研究与开发。在过去的十几年内 RP 技术取得了迅速的发展, 已成为一种新的制造行业。专业快速原型服务的全世界多达 284 家, 其中 145 家在美国, 约占总数的 51%, 在欧洲多数国家集中于 RP 的应用研究, 德国公司 EOS 公司和 Fockel & Schwarze 公司在开发和销售 RP 系统^[22]。

随着 RP 工业的兴起, 国外进行快速原型技术研究的科研机构和公司已很多, 如美国的 3D 系统公司、代顿大学、麻省理工学院、斯坦福大学、德克萨斯大学、密西根大学、桑地亚国家实验室、俄亥俄州州立大学国家实验室、挪威技术学院、日本东京大学、新加坡国立大学和南洋理工大学等。关于快速原型技术的学术会议也很多, 比如在代顿大学从 1990 年开始每年召开的 RP 国际会议; 在德克萨斯大学召开的快速原型研讨会; 在国内也分别于 1996 年在清华大学和 1998 年在西安交通大学召开了两界全国快速原型技术应用学术会议以及 1998 年在北京召开了快速原型技术的国际学术会议。

我国从 1991 年开始 RP 技术的研究, 在 RP 方面的应用和研究还很薄弱, 市场对它的需求和认识还有一个过程。目前, 清华大学、华中科技大学、西安交通大学、北京隆源快速成型公司等单位在 RP 设备及材料方面做了大量的研究工作, 已有清华大学生产的 LOM 和 FDM 系列成型机^[23], 西安交通大学开发的 LPS CPS 系列快速成型机^[24], 华中理工大学开发 LOM 工艺的成型设备, 北京隆源自动成形系统有限公司开发的 AFS 快速成型机。香港地区 RP 学术活动也很活跃, 主办了有关 RP 的学术会议, 在 RPM 软件、RPM 系统的集成开发以及反求建模等方面开展了较多研究。

1.5 应用于陶瓷快速原型制造技术的主要工艺

近 20 年来, 快速成型技术得到了长足的发展, 仅已研究开发的快速成型工艺就有十几种, 新的工艺还在不断地出现。其中主流的快速原形制造成型工艺主要有立体光刻成型 (Stereolithography Apparatus 简称 SLA)、选择性激光烧结成型 (Selective Laser Sintering 简称 SLS)、熔融堆积成型 (Fused Deposition Modeling 简称 FDM)、分层实体制造 (Laminated Object Manufacturing 简称 LOM)、熔融沉积成型 (Fused Deposition of Ceramics, FDC)、油墨喷射印刷成型 (Ink Jet Printing 简称 IJP)、三维打印成型 (3-Dimensional Printing, 3DP)

等，下面将对各快速原型技术进行介绍。

(1) 立体光刻成型 (Stereolithography Apparatus, SLA) [26-28]

立体光刻又称立体印刷或光敏液相固化法。立体光刻成型技术 (Stereo Lithography Apparatus, SLA) 最早由Charles Hull于1984年申请专利，后由美国3D Systems公司实现商业化的。最初该技术主要应用于高分子的成型，将其用于陶瓷零件成型的研究则刚刚起步^[25]。立体光刻成型示意图如图1-8所示，图1-3为立体光刻的模型。

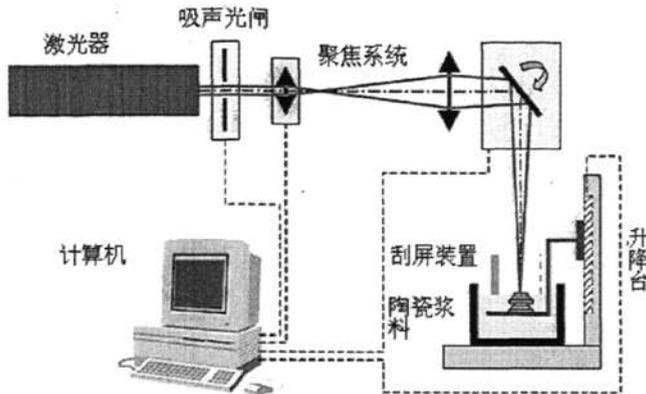


图 1-8 立体光刻成型系统示意图

Fig. 1-8 Schematic illustration of SLA

其成型过程为：在制备陶瓷零件时，首先将陶瓷粉与光固化树脂混合制成陶瓷料浆，铺展在工作平台上，通过计算机控制紫外线选择性照射料浆表面。含有陶瓷粉的料浆通过光聚合形成高分子聚合物结合的陶瓷坯体。通过控制平台在Z方向的移动，可以使新的一层料浆流向已固化部分表面。如此反复循环，最终形成所需的陶瓷零件坯体^[4]。SLA法的工艺特点是：①可生成任意复杂形状的零件；②成形精度较高，可达 $\pm 0.1\text{mm}$ 左右的制造精度；③材料利用率高，性能可靠。由于单分子溶剂中加入陶瓷粉后，粘度会增加，就要求延长z方向等待时间以保证铺层平整，这样势必会使成型时间延长，降低成型效率。SLA法工艺适用于产品外形评估、功能试验、快速制造电极和各种快速经济模具；不足之处是所需设备及材料价格昂贵，光敏树脂具有一定毒性，不符合绿色制造趋势。

目前国内西安交通大学也拥有SLA法商品化的产品。美国3D System公司开发了SLA-3500、SLA5000机型，使用半导体激励固体激光，扫描速度分别达到2.54m/s和5m/s，成型层厚最小可达0.05mm。该公司还采用了一种称之为

Zephyer Recoating System的新技术,即在每一成型层上,用一种真空吸附刮板在该层上涂一层0.05~0.1mm的待固化树脂,使成型时间平均缩短了20%。日本三菱商社下属的CMET公司研制了SOUP系统。日本帝人精制公司的SOLIFORM系统,可直接制作注射成型模具和真空注塑模具。日本Kyushu Institute of Technology使用5 μ m光斑的紫外光,1 μ m的定位精度,用消失模铸造的方法生产出聚合物与金属混合的零件,零件大小约为50 μ m。

(2) 选择性激光烧结成型(Selective Laser Sintering,SLS)^[29-33]

该技术最早由C.Deckard和J.Beaman开发成功,并由DTM公司实现商业化。在SLS中,首先将粉料铺在工作平台上,然后利用计算机控制的激光束扫描特定区域的粉末,使该区域的粉末受热熔融从而逐层粘结固化。当这一层扫描完毕后,添加新一层的粉料,继续重复上述工作,最终形成三维部件。用于该技术的原料可以是塑料、蜡粉、金属粉和陶瓷粉等。一般经SLS加工的陶瓷坯体致密化程度较低,需要后续的烧结处理。图1-9为该系统示意图。SLS制件模型如图1-4所示。

J. P. Kruth等综述了SLS及SLM中的不同结合机理,认为SLS/SLM过程可以分为四类,即固态烧结(solid state sintering)、化学引发结合(chemically induced binding)、液相烧结-部分熔融(liquid phase sintering-partial melting)及全熔(full melting)。他们认为大多数的成型过程属于后两类并且结合机理极大影响成型速度并带来迥异的产品性能。

Marcus等利用SLS制成了Al₂O₃齿轮和其它零部件,具有较高的成型精度。C. Griffin等利用SLS成型的Al₂O₃陶瓷部件,坯体密度可达理论密度的53%-65%。

SLS工艺的特点是取材广泛,不需要另外的支撑材料。所用的材料包括石蜡粉、尼龙粉和其它熔点较低的粉末材料。目前,直接烧结熔点较高的金属粉、陶瓷粉工艺正在研究之中。目前研究选域激光烧结工艺的有DTM公司、EOS GmbH公司、北京隆源公司、南京航空航天大学和华南理工大学等。国内北京隆源公司、华中科技大学可提供SLS这类成形工艺设备。DTM公司的选域激光烧结设备主要有SLA-500、Sinterstation2000、AFS-300和FDM1600等系列。北京隆源公司推出了AFS-300成型机及数种材料,其最大成型尺寸为 ϕ 300mm \times 400mm,采用CO₂激光器,功率为50W,激光定位精度为 \pm 0.1mm,扫描速度为0.5~2m/s,烧结成型的层厚为0.1~0.25mm。华中理工大学开发出HRPS-I型成型机。

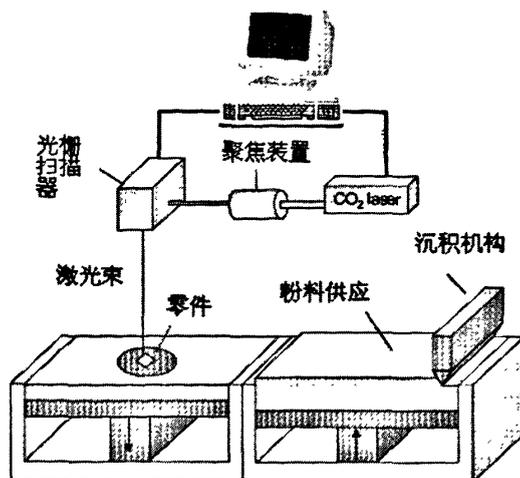


图 1-9 选择性激光烧结成型系统示意图

Fig. 1-9 Schematic illustration of SLS

(3) 熔融堆积技术 (Fused Deposition Modeling, FDM) [34]

FDM 技术是由美国 Stratasys 公司开发成功并实现商业化的。在 FDM 中，通过计算机控制将由高分子材料（如 ABS 塑料）或石蜡制成的细丝送入熔化器，在稍高于其熔点的温度下熔化，再从喷嘴挤至成型平面上，通过控制喷嘴在 x-y 方向和工作平台在 z 方向的移动可以实现三维部件的成型。熔融堆积技术工作原理模型如图 1-10 所示。图 1-5 为 FDM 鼠标模型。这种方法韧性好，生产效率较高，但价格高，表面精度较低。FDM 成型系统有北京方明达公司的 F-260 型快速成型机，其最大建模尺寸 260mm×260mm×260mm；模型精度误差为±0.2mm，挤喷的层宽可在 0.3~2mm 之间，层厚为 0.05~0.8mm。此外，还有美国 Stratasys 公司的 FDM 系列和美国 Sander 公司的 Model Maker 喷墨立体打印系统。

(4) 熔融沉积成型 (Fused Deposition of Ceramics, FDC) [1,35]

FDC 技术是由 FDM (Fused Deposition Modeling) 技术发展而来的，由 FDM 发展为 FDC 工艺如图 1-11 所示。FDC 技术的原理是将 CAD 模型分为一层层极薄的截面，生成控制 FDM 喷嘴移动轨迹的二维几何信息，用加热装置将陶瓷材料及特制的粘结剂加热熔融，经喷头上的喷嘴一层层扫描堆积而形成物理原型，去除支撑、底托等，便可得到原型^[17]。FDC 生产效率较高，但表面精度较低。在 FDC 中通常将陶瓷粉体与特制的粘结剂混合，挤制成细丝。该工艺对丝的要求较为严格，需要合适的粘度、柔韧性、弹性模量、强度和结合性能等。

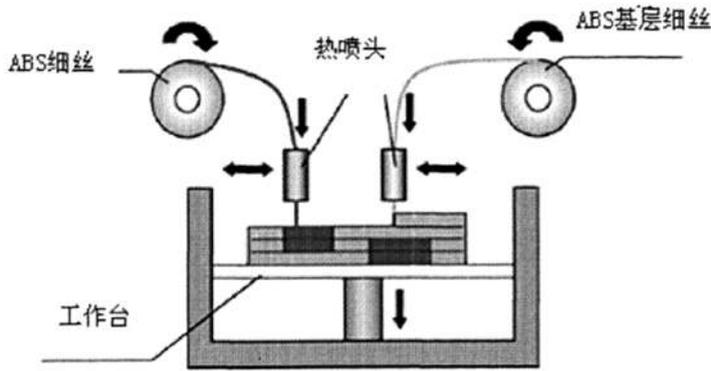


图 1-10 FDM 技术工作原理示意图

Fig. 1-10 Schematic illustration of FDM

Crealich 等^[36]在 FDM 基础上提出了多成分喷射成型工艺 MJS (Multiphase Jet Solidification), 它是通过喷嘴将熔化的低粘度的材料喷射沉积成型, 它与 FDM 的主要不同之处是原材料和送料系统。对于 MJS, 成型材料是多种成分的, 由陶瓷粉体和粘结剂组成的混合物来代替 FDM 中的挤丝材料, 其成型过程是将混合物加热熔化后, 在一定的压力下, 通过喷嘴喷出沉积成型, 这种成型方式弥补了 FDM 成型的不足之处, 它选择材料范围广, 但此工艺的缺点在于它很难控制沉积形状, 尤其对于微小结构, 尺寸不够精确。

S. Rangarajan 等研究了 Si_3N_4 熔融沉积成型过程中给料的粉体成型过程、流变学特性及机械力学性能。以 Si_3N_4 (GS44) 为陶瓷粉体, RU9 为粘结剂, 油醇为分散剂, 研究了温度、固含量及油醇浓度对浆料粘度的影响。

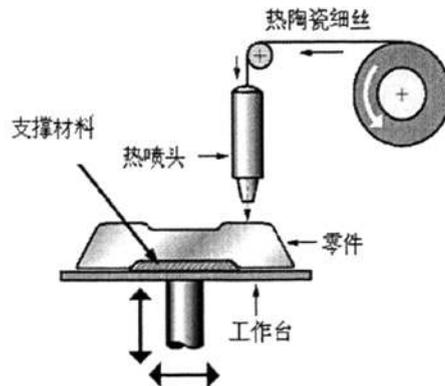


图 1-11 FDC 技术工作原理示意图

Fig. 1-11 principle Schematic illustration of FDM

研究表明,油醇充当增塑剂后浆料表现出剪切变稀的行为。RU9中加入 Si_3N_4 (GS44)的浆料粘度随着温度增加减小,但随着固含量增加增大。185℃下55vol%固含量的浆料粘度在49-7Pa·s之间,对应的剪切速率在70-1128 s^{-1} ,合适的挤出参数对应于 $1.1\Delta P < \sigma_E$ 。

(5) 分层实体制造(Laminated Object Manufacturing,LOM)^[1,37]

分层实体制造(LOM)是快速成型制造领域中研究陶瓷零件制造较早的一种工艺方法,是美国的Helisys公司开发并实现商业化的。LOM工艺利用激光在x-y方向的移动切割每一层薄片材料。每完成一层的切割,控制工作平台在z方向的移动以叠加新一层的薄片材料。激光的移动由计算机控制(如图1-12所示),图1-7为LOM模型。层与层之间的结合可以通过粘结剂或热压焊合。由于该方法只需要切割出轮廓线,因此成型速度较快,且非常适合制造层状复合材料。美国的Helisys公司的LOM系列有LOM-1015和LOM-2030两种规格,可加工尺寸分别为381mm×245mm×355mm和81.8mm×558.8mm×508mm,分别配25W、40W、50W的 CO_2 激光器。片料层厚最小为0.0127mm,制造精度为0.238mm。

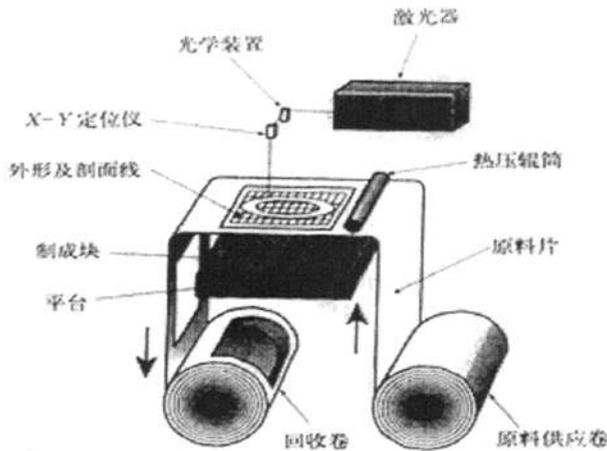


图1-12 分层制造成型示意图

Fig. 1-12 Principle Schematic illustration of LOM

(6) 油墨喷射印刷成型(Ink Jet Printing,IJP)

喷墨打印成型技术是将待成型的陶瓷粉与各种有机物配制成陶瓷墨水,通过打印机将陶瓷墨水打印到成型平面上成型。喷墨打印系统如图1-13所示。Seerden等^{[8][38]}采用IJP成型陶瓷零件时,用石蜡作为介质加入到氧化铝粉体中,得到墨水的固相含量达到体积分数20%,得到较为致密的烧结体,但由于

粘度太大，喷射较为困难。

Song等人^[39]制备了适合于多层打印的陶瓷墨水，研究认为，选择合适的粘结剂及分散剂，并且通过高速剪切及超声搅拌可以得到含氧化锆的陶瓷墨水，并且可以打印出2.5mm厚的齿形。研究认为陶瓷粉体在墨水中的分散方式对于墨水精确定位有决定性作用，而齿形的表面形貌与干燥速率有关。

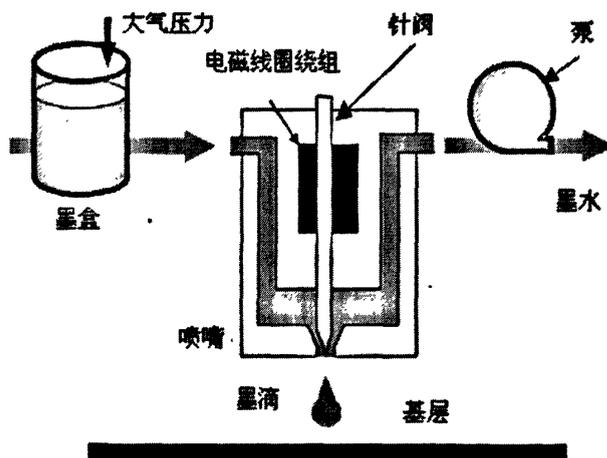


图 1-13 喷墨打印系统示意图

Fig. 1-13 Schematic illustration of IJP

(7) 三维打印成型 (3-Dimensional Printing, 3DP) ^[40,41]

该技术主要由美国的Solugen公司和MIT开发。3DP的成型过程与SLS相似，只是将SLS中的激光变成喷墨打印机喷射结合剂。图1-14为其原理示意图,图1-6

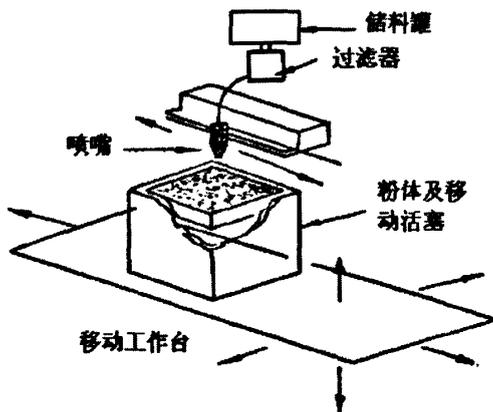


图 1-14 三维打印成型示意图

Fig. 1-14 Schematic illustration of 3-DP

为3D打印模型。该技术对制造致密的陶瓷制件具有较大的难度，但在制造多孔的陶瓷制件（如金属陶瓷复合材料的多孔坯体或陶瓷模具等）方面具有较大的优越性。

MIT的E. Sachs等利用3DP成型了三维陶瓷制件，成型用粉体为 Al_2O_3 ，粘结剂为胶状的硅酸，成型的制件共50层，每层厚0.005in。

1.6 课题研究的目的和意义

陶瓷零件快速制造技术的研究在过去十几年已得到了飞速的发展，国内外的研究很多，而且很多技术已经迅速的从实验室走向市场，在许多领域都有广泛的应用。目前，陶瓷器件的快速制造在国内处于起步阶段，在国外也尚未真正成熟。已经用于制备陶瓷零件的快速制造工艺主要有立体光刻成型(SLA)、形状沉积成型(SDM)、分层实体制造(LOM)、熔融堆积成型(FDM)、选域激光烧结(SLS)、三维印刷(3DP)等。但是这些快速原型技术都或多或少的存在着一定的缺陷，比如这些成型方法大多需要激光成型，制造成本较高，并且设备昂贵，或者对材料的要求较高，制造出的零件精度较低，成型的零件性能不是很理想，均很难达到经济的目的。由于快速原型制造技术属于高科技技术，对操作人员的素质要求很高，这些都不符合我国的国情，大大地制约了快速成型技术在中国的推广发展，不能使之更好地实现产业化。考虑到数控技术在我国相对比较普及、掌握数控技术的技术人员较多的特点，为了充分利用现有条件，降低设备成本，试图开发出一种适合在中小型企业推广应用的陶瓷零件快速成型机，以满足市场化的需求。

新开发的陶瓷零件的快速成型机结合了RP的快速制造和数控的相对易操作性，而且具有成本低廉、可加工原料来源广泛、制件性能优良的特点。

本课题通过配合正在开发的陶瓷零件快速制造的新工艺—基于石蜡速凝特性的层合速凝快速成型技术，设计研制出一种快速制造陶瓷零件的快速成型机。该研究对于正在起步阶段的陶瓷零件快速制造设备的研制，对于加快快速原型制造陶瓷零件设备在中国的产业化有着重要的意义。

1.7 课题的主要研究内容

基于以上对陶瓷零件快速原型技术的研究现状的回顾与分析，本文主要探讨了基于石蜡速凝特性的层合速凝快速成型技术研制的陶瓷零件快速成型机数控系统的设计研究过程。具体的内容如下：

- (1) 首先介绍了基于石蜡速凝特性的层合速凝快速成型技术基本工艺方

法，针对该技术的工艺要求拟定了设计方案。

(2) 设计了陶瓷零件快速成型机的机械系统，分析了陶瓷零件快速成型的动作原理，以及各部件的位置关系，生成了部件分解图。重点介绍了铺料机构的组成和动作原理。因为成型机的进给机构在一定程度上影响着零件的加工精度，因此，利用 Pro/Mechanism 模块对成型机的进给系统进行了运动学仿真分析，并得出了相应的结论。对陶瓷零件快速成型机的重要零件如齿轮、丝杠等重要零部件进行了选取。

(3) 根据系统控制的要求，在分析比较了几种开放式数控系统的体系结构和开放性的基础上，采用“NC 嵌入 PC”也即“IPC+PMAC”的方式来搭建开放式数控系统，这样系统具有很大的开放性。设计了控制方案，分析了 PMAC 运动卡的结构和功能，采用了双闭环的交流伺服控制系统，对主轴变频器、交流伺服驱动器、交流伺服电机进行了计算选取。设计完成了成型机的硬件连接部分，搭建了硬件图。

(4) 建立了进给交流伺服控制系统的数学模型，在经典控制理论的基础上，运用 Matlab/SIMULINK 对进给交流伺服控制系统进行了 PID 仿真分析，得出了系统的相应曲线，并分析得出了系统的稳态误差。

(5) 分析了 PMAC 卡的 PID+速度/加速度前馈+NOTCH 滤波的控制环算法以及双反馈系统，运用 PEWIN 软件进行了 PMAC 的 PID 整定。经调试使系统获得了良好的性能。

(6) 搭建了陶瓷零件快速成型机的数控系统软件部分，采用模块化的设计思路，对程序的上载和下载，PMAC 的 PLC，系统的 PMAC 插补模块和数据采集分别作了分析。

(7) 采用基于石蜡速凝特性的层合速凝快速成型技术的方法进行了制备陶瓷零件实验，实验结果表明，陶瓷零件的性能基本达到要求，从而对该技术进行了实验验证。

2 陶瓷零件快速成型机机械系统

2.1 基于石蜡速凝特性的层合速凝快速成型技术

王秀峰等^[42~45]提出了层合速凝成型，并在此基础上提出了基于石蜡速凝特性的层合速凝快速成型技术，该技术已经申请了专利。

层合速凝成型技术的主要思路是先用三维造型软件在计算机中生成制件的三维实体模型，然后用分层软件对其进行分层处理，将三维实体模型分成厚度为0.1~2.0 mm的一系列薄层，得到每层的形状，先铺一层支撑材料，由计算机控制刻刀按分层的图案刻出该层图形，在镂空处填充成型材料，重复累加之后去除支撑并烧结，最终形成陶瓷制件。

陶瓷零件快速成型机的设计研究是在王秀峰教授等提出的基于石蜡速凝特性的层合速凝快速成型技术的基础上研制的。

基于石蜡速凝特性的层合速凝快速成型技术包括CAD模型数据的获取和建立、层片模型NC代码的生成、石蜡支撑材料的制备与铺设、层片模型的成型铣削等。具体的工艺如下：先用三维造型软件在计算机中生成制件的三维实体模型，然后用分层软件对其进行分层处理，将三维实体模型分成厚度为0.1~2.0 mm的一系列薄层，得到每层的形状。然后由主机根据实体模型分层情况控制铺料机构在铺料平台上铺设一层蜡浆，并用刮平器刮平，凝固成蜡片。待石蜡冷却后由计算机发信号给数控设备，在凝固的蜡层上镂空每一层片模型，雕刻下来的石蜡用鼓风机吹走。然后主机发出指令，控制铺料料斗将在70~110℃熔化的含有陶瓷粉含量为70~90wt%的蜡浆铺设在先前制备好的蜡板上，待浆料填平蜡板的凹处后，用热刮平器将蜡板薄层上多余的蜡料刮掉。重复以上步骤，逐层累积得到原型，最后将坯体排蜡烧结，得到陶瓷坯件。该工

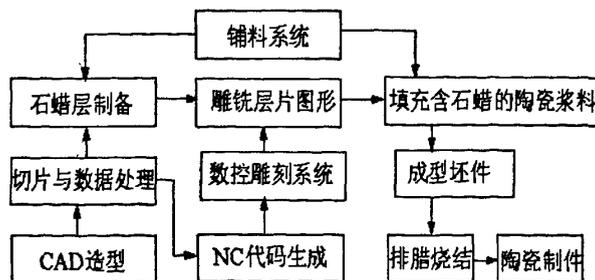


图 2-1 基于石蜡速凝特性的层合速凝快速成型技术

Fig.2-1 RPM for ceramic parts based on the quick solidification of wax

艺降低了产品的生产成本，缩短了生产周期。其技术工艺流程见下图 2-1 所示，陶瓷零件快速制备见图 2-2 所示。

该技术是以石蜡和含有陶瓷粉的蜡浆为原料，石蜡能够迅速凝固，具有硬度很低、易于加工且成本低的优点，利用目前已经相当成熟的热压铸蜡浆为原料，极大的降低了生产成本，而且由于采用了快速成型的原理，陶瓷制件的生产周期也大大缩短。同时，利用热压铸蜡浆的优异性能，将其用于陶瓷制件快速制造，弥补了当前快速制造陶瓷制件的不足。还可以通过更换陶瓷粉的种类来实现其它陶瓷材料制件的生产，甚至于高性能的结构陶瓷材料制件。此外，该技术中坯件的支撑是快速成型设备内部具有的，设备本身的支撑结构和所有已经构建好的薄层为后续薄层提供支撑，支撑材料为工业石蜡，来源广泛，不受制约。

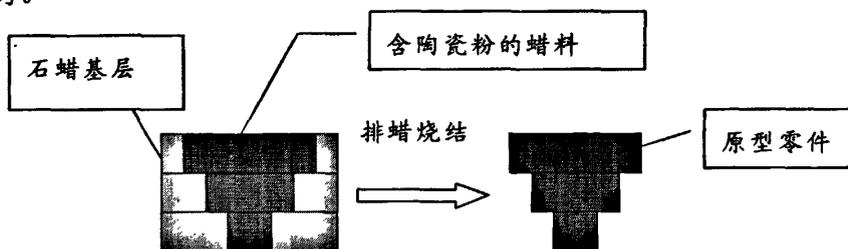


图 2-2 基于石蜡速凝特性的陶瓷零件快速成型示意图

Fig.2-2 Schematic illustration of RPM for ceramic parts based on the quick solidification of wax

2.2 陶瓷零件快速成型机机械系统设计

2.2.1 陶瓷零件快速成型机工作原理

本课题在基于石蜡速凝特性的层合速凝快速成型技术理论的基础上，设计开发了陶瓷零件快速成型机。陶瓷零件快速成型机主要由雕刻系统、铺料系统、以及刮平机构、仓料开合机构、搅拌机构等辅助机构组成。其中，铺料平台固定在工作台上。陶瓷零件快速成型机结构如图 2-3 所示。

陶瓷零件快速成型机的工作原理为：在未进行铺料和雕刻等动作之前，铺料平台上升到一定高度，将陶瓷浆料和石蜡分别放入盛料仓中，加热至熔融状态（加热温度由温控仪控制）用盖子盖好料斗外壳上面开口，以防石蜡挥发。在铺第一层石蜡浆料之前，先在铺料平台的凹槽里预铺一层石蜡浆料，待凝固后开始启动铺料系统工作。首先铺料系统沿水平方向铺一层石蜡浆料，此时计算机控制陶瓷浆料盛料仓下料口闭合，石蜡盛料仓下料口打开，进行铺层。当料斗行进将至行程末端时，接近开关发出信号，主机控制料斗停止运动并命令

料斗返回起始位置，返回过程中料斗下料口全部为闭合状态，待将近起始位置时另一接近开关发出信号，料斗停止。由主机发出指令控制刻刀在石蜡板上刻出零件截面形状，由吹风装置吹走石蜡屑，清洁镂空部分。由主机和三维实体模型分层信息编制出的数控程序控制料斗的水平运动和插补运动。

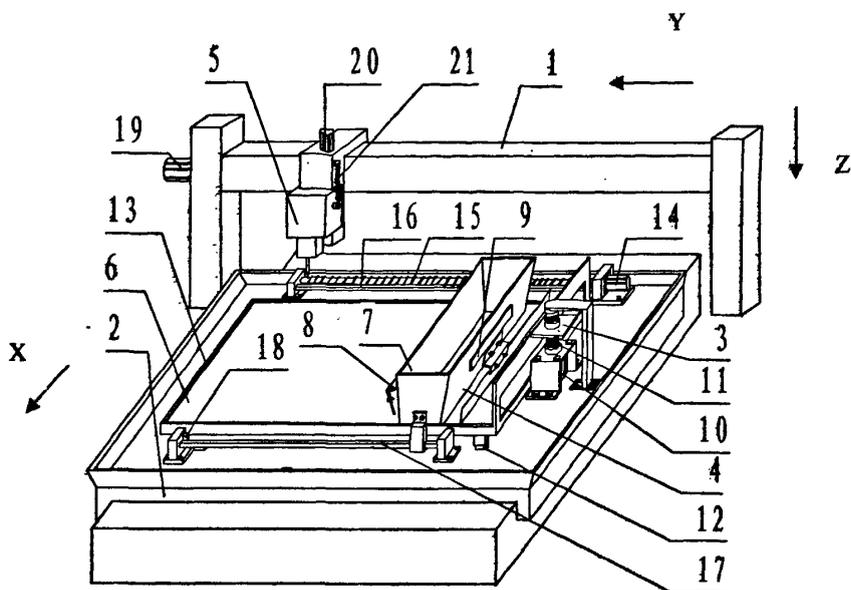


图 2-3 陶瓷零件快速成型机结构图

1.机架 2.工作台水平运动装置 3.铺料台升降装置 4.铺料系统 5.雕刻系统 6.铺料台 7.料斗 8.刮平装置 9.加热装置 10.铺料台升降驱动电机 11.y 向滚珠丝杠 12.y 向导轨 13.铺料台凸形边缘 14.料斗 x 向运动驱动电机 15、16、17.料斗 x 向运动丝杠导轨 18.接近开关 19.刻刀 x 向运动驱动电机 20.刻刀升降驱动电机 21.弹簧

Fig.2-3 Structure of the machine tool about rapid prototyping manufacturing for ceramic parts

刻完后由主机控制刻刀复位，发出铺陶瓷浆料的指令，步骤与铺石蜡步骤相同，此时陶瓷浆料盛料仓下料口打开，石蜡盛料仓下料口关闭。在铺料过程中，刮板起到刮平层面和使陶瓷浆料充分填平的作用。在刮平过程中，须控制刮板底的高度始终在所铺石蜡层上表面以下 0.1-0.5mm，以充分刮去石蜡表层多余的陶瓷浆料，以避免形成陶瓷夹层影响制件的质量。刮平陶瓷浆料层之后，主机控制铺料平台下降 0.1-2mm，重复上述操作步骤，多次叠层之后形成陶瓷坯件。对陶瓷坯件进行排蜡处理烧结，即可得到陶瓷制件。

2.2.2 陶瓷零件快速成型机铺料系统

铺料系统是陶瓷零件快速成型机的重要组成部分，其主要功能是完成熔融蜡浆和混有石蜡的陶瓷浆料的铺设。如图 2-3 所示，铺料机构主要有由铺料台 6、料斗 7、刮平装置 8、加热装置 9、工作台水平运动装置 2、铺料台升降装置 3 及搅拌装置（图 2-3 中未表示）、导轨等组成。铺料台 6 作为铺料机构固

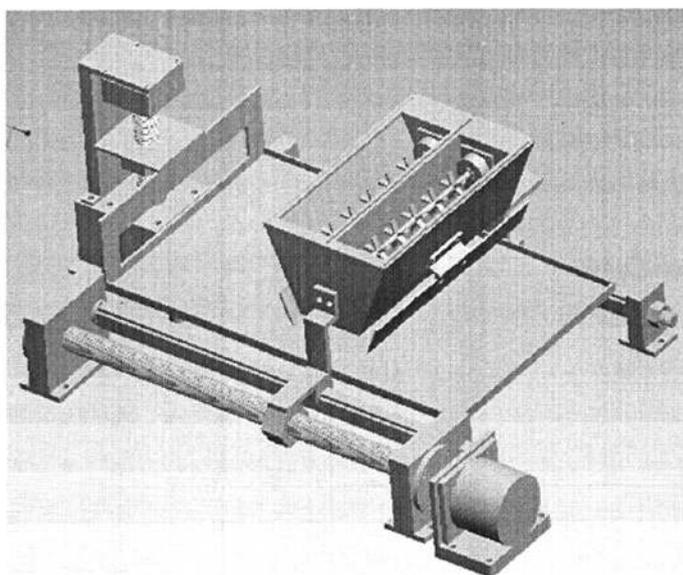


图 2-4 铺料系统的虚拟装配

Fig.2-4 Virtual assembly for paving slurry system

有的机械支撑主要作用是在该平台上铺设石蜡和混有石蜡的陶瓷浆料，料斗 7 用来盛放石蜡和混有石蜡的陶瓷浆料，料斗底部设有能够开合的出料口。加热装置作用是通过温控仪控制加热器对料斗里的石蜡进行加热，并控制其温度，使石蜡保持熔融的状态，以利于熔融的石蜡能够流出出料口，在加热的同时，电机通过齿轮传动带动搅拌辊搅拌浆料，以防止沉淀。

工作台水平运动装置 2 包括伺服电机、丝杠、导轨等，其作用是通过电机的正反转带动丝杠控制料斗的水平运动铺设石蜡，而铺料台升降装置 3 用来控制铺料平台的升降，以利于下一层石蜡的铺设。刮平装置用来刮平料斗刚铺设的石蜡，以防止蜡料的堆积，影响坯件的质量，在导轨末端装有接近开关，用于料斗的行程控制。

在结构设计的基础上，在 Pro/E 环境下对铺料机构进行了虚拟装配和分解。运用 Pro/E 软件可以进行距离的测量、检查干涉质量以及检查模型的模型曲面

的连续性，铺料机构的三维装配图如图 2-4 所示，图 2-5 为铺料机构的分解图。

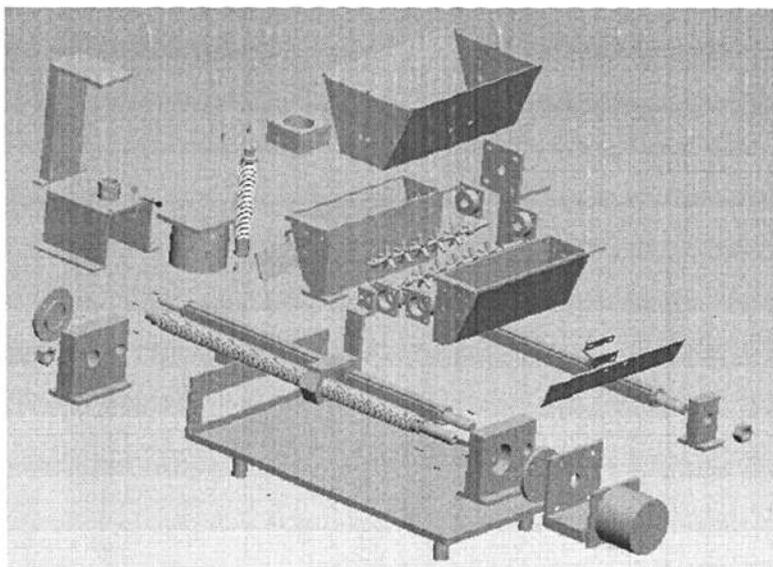


图 2-5 铺料系统分解图

Fig.2-5 Break schematic for paving slurry system

2.2.3 陶瓷零件快速成型机雕刻系统

如图 2-3 所示，雕刻机械系统主要有机架 1、主轴进给机构、刻刀、刻刀 x 向运动驱动电机 19、刻刀升降驱动电机 20 等组成，刻刀可在 X 向实现水平运动和 Z 向实现升降运动，工作台主要在 Y 向运动。三维模型分层信息转换为 CNC 加工信息之后，主机控制该雕刻机械系统在铺设好已冷却的石蜡层上雕铣制件每一层的形状，以利于后继的陶瓷浆料的填充。

2.2.4 陶瓷零件快速成型机料斗的设计

料斗的功能是用于盛放和搅拌浆料，使浆料成分保持均匀的作用。料斗主要由料斗外壳、盛料仓、刮平装置和加热装置组成。

如图 2-6 所示，搅拌装置由电机 1 带动齿轮 2 转动，使之与图 2-7 中的齿轮 1 啮合，带动搅拌辊 2 转动，实现搅拌运动，使浆料保持均匀，不发生沉淀。盛料仓一共两个，外形尺寸都与图 2-7 相同，电机 1 通过带动齿轮 2 转动，继而与两个模数和齿数相同的齿轮相啮合，从而带动两根搅拌辊转动，搅拌浆料。

如图 2-7 所示，盛料仓的下料口 3 为活页式，由电磁继电器控制其开合。铺料时，相应的盛料仓下料口打开，另一盛料仓下料口闭合。盛料仓通过两端外延挂钩 4 卡挂在料斗外壳壁上的凹槽处。石蜡仓结构与陶瓷浆料仓相同。料

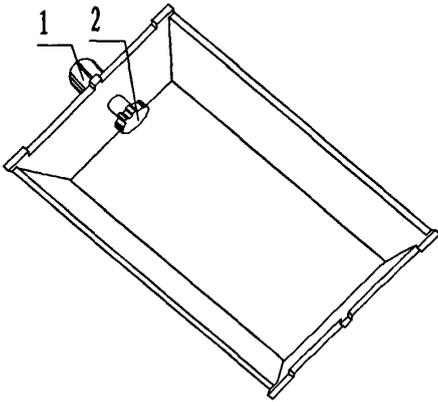


图 2-6 料斗外壳示意图

Fig.2-6 Schematic illustration of the hopper crust

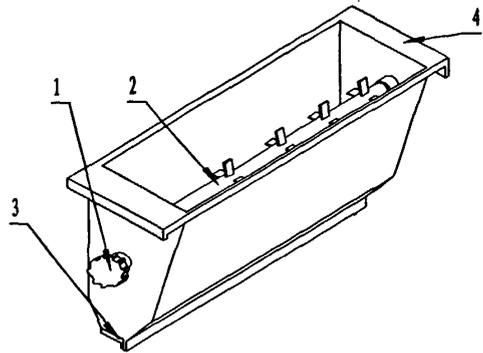


图 2-7 盛料仓示意图

Fig.2-7 Schematic illustration of the hopper

斗外壳两侧装有刮平装置（图 2-3 中 8），在每次铺料完成后刮平铺料层，去除余料并填实镂空部分。为保证浆料的流动性，在料斗外壳装有加热板（图 2-3 中 9）持续加热，使料斗及刮板的温度保持在石蜡的熔融温度，可使刮板在刮料过程中尽可能少发生粘连带料现象，从而保证刮板的清洁和铺料层的平整。加热板的温度由温控仪控制。

2.2.5 陶瓷零件快速成型机铺料系统的运动学仿真分析

Pro/Mechanism 是 Pro/E 中的运动学仿真模块，其主要是通过设定的原动件上添加伺服电机驱动机构运动，进而分析结构的运动特点。运动分析不考虑施加力的影响，它模拟质量和力之外的运动的所有特征。机构装配好以后，在建立欲分析的机构组装和定义驱动条件电机后，机构就会自动根据装配类型运动而不受其它因素的影响。

铺料系统是陶瓷零件快速成型机的重要组成部分，特别是进给运动，其运动性能的好坏在一定程度上影响着铺料的质量。因此，有必要对铺料系统的进给系统进行运动学仿真，仿真的环境是在 Pro/E 的 Pro/Mechanism 模块中进行的，把测量点定义在丝杠螺母上。所测得的速度和加速度曲线如图 2-8，图 2-9 所示。

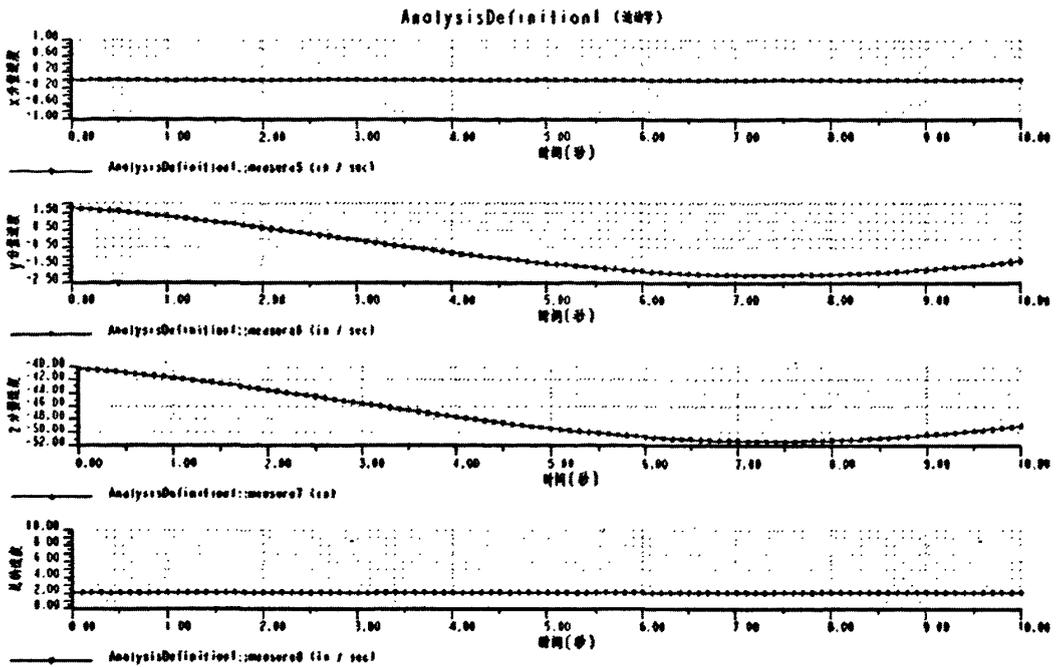


图 2-8 速度运动曲线

Fig.2-8 The curves of the speed

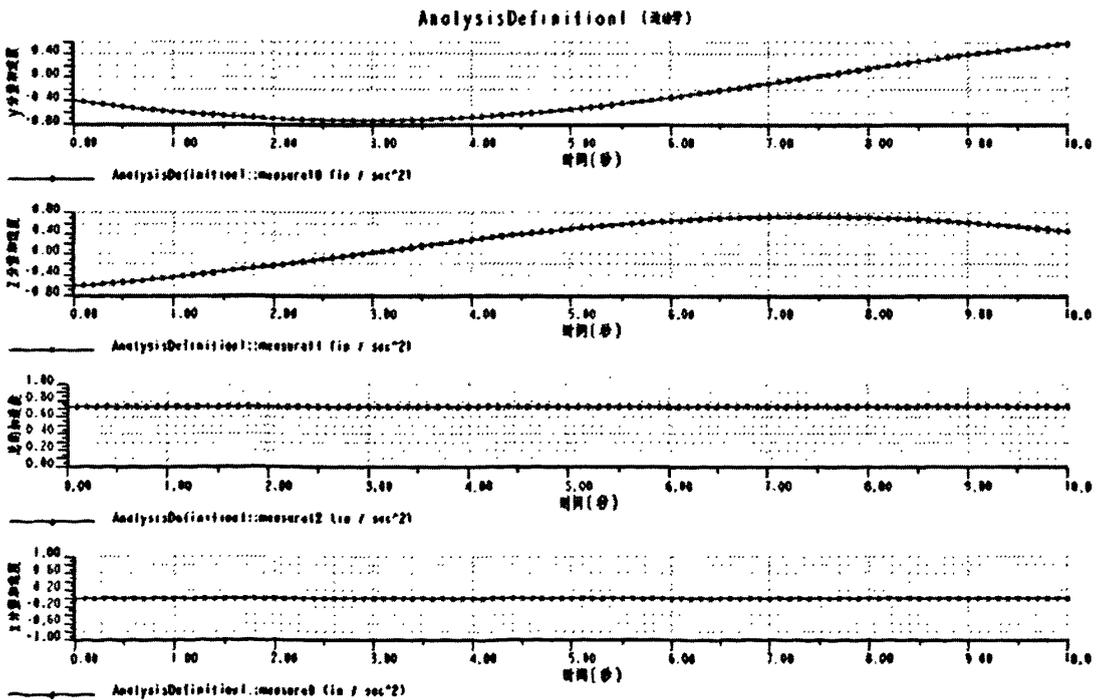


图 2-9 加速度运动曲线

Fig.2-9 The curves of the acceleration

由图 2-8 和 2-9 测试可以看出，测试点 X 分量的速度和加速度保持不变，而 Y 分量和 Z 分量的速度和加速度略有变化，说明丝杠的径向分量速度是变化的。但是，从测试图中可以看出总的合成速度和加速度维持恒定，说明丝杠基本维持匀速运动，有利于料斗的平稳运行，不至于对行程开关产生大的冲击，同时，有利于蜡浆的均匀铺设，减少材料浪费。

2.3 陶瓷零件快速成型机零部件的选取计算

2.3.1 丝杠的计算校核

丝杠可分为普通丝杠和滚珠丝杠两种，考虑到普通丝杠的传动精度并不高，而且相对滚珠丝杠而言比较经济，因此，本课题选用梯形螺纹丝杠。现以工作台水平运动所用丝杠为例进行设计计算，铺料台升降运动所用丝杠的计算方法与此相同。

a 滚珠丝杠的材料的选择

螺杆材料选 45 钢，调质处理。

$\sigma_s = 360N/mm^2$ ，查表得

$$\sigma_p = \frac{\sigma_s}{3 \sim 5} = 120 \sim 72N/mm^2, \text{ 可取 } \sigma_p = 100N/mm^2$$

螺母材料选 $ZCuAl_{10}Fe_3$ 查表得

$\sigma_{bp} = 40 \sim 60N/mm^2$ ，取 $50N/mm^2$ ；

$\tau_p = 30 \sim 40N/mm^2$ ，取 $35N/mm^2$ 。

螺旋系低速，查表得

$p_p = 1 \sim 2N/mm^2$ ，取 $1N/mm^2$

b 螺纹中径计算

一般机床丝杠轴向外加工作载荷主要是丝杠轴向外加载荷和导轨摩擦阻力合成力矩。现在考虑一般切削的情况，外加载荷产生的摩擦力矩为：

$$F = F_x + F_f = F_x + f \cdot (W + F_z) = 900 + 0.009 \times (500 + 700) = 910.8N \quad (2-1)$$

F_x 为X方向切削力， F_z 为Z方向切削力

其中：摩擦系数 $f = 0.009$ ，丝杠副效率取 $\eta = 0.8$

由此可知，轴向载荷为 $F = 910.8N$ ，

取

$$\begin{aligned} \varphi &= 1.7, \\ d_2 &= 0.8 \sqrt{\frac{F}{\varphi p_p}} \\ &= 0.8 \sqrt{\frac{910.8}{1.7 \times 1}} \\ &= 19.12mm \end{aligned} \quad (2-2)$$

由 GB/T 5796.3—1986 可选 $d=20\text{mm}$; $p=4\text{mm}$;

$$d_2 = d - 2Z = d - 0.5p = 20 - 0.5 \times 4 = 18\text{mm} \quad (2-3)$$

$$D_4 = d + 2a_c = 20 + 2 \times 0.25 = 20.5\text{mm} \quad (2-4)$$

$$d_3 = d - 2h_3 = 20 - 2 \times 2.25 = 15.5\text{mm} \quad (2-5)$$

$$D_1 = 2H_1 = d - p = 20 - 4 = 16\text{mm} \quad (2-6)$$

的梯形螺纹，中等精度。

螺旋副标记为 $Tr20 \times 4$ —— $7H/7e$

螺母高度 $H = \phi d_2 = 1.7 \times 18 = 30.6\text{mm}$ ，取 $H = 31\text{mm}$

则螺纹圈数

$$\frac{H}{P} = \frac{31}{4} = 7.75 \text{圈} \quad (2-7)$$

c 螺旋副传动自锁性验算

$$\text{导程 } S = P = 4\text{mm}, \text{ 螺纹升角为 } \lambda = \arctan \frac{S}{\pi d_2} = \arctan \frac{4}{\pi \times 18} = 4.05^\circ \quad (2-8)$$

查表得钢对铜的摩擦系数 $f = 0.08 \sim 0.10$ ，取 $f = 0.09$ ，可得：

$$\begin{aligned} \rho' &= \arctan \frac{f}{\cos \frac{\alpha}{2}} = \arctan \frac{0.09}{\cos 15^\circ} \\ &= 5.323^\circ \end{aligned} \quad (2-9)$$

因为 $\lambda < \rho'$ ，故自锁可靠。

d 丝杠强度校核

螺纹摩擦力矩：

$$\begin{aligned} M_{11} &= \frac{1}{2} d_2 F \tan(\lambda + \rho') \\ &= \frac{1}{2} \times 14 \times 1000 \times \tan(4.05^\circ + 5.323^\circ) = 1155.5\text{N} \cdot \text{mm} \end{aligned} \quad (2-10)$$

代入，得：

$$\begin{aligned} \sigma_{ca} &= \sqrt{\left(\frac{4F}{\pi d_1^2}\right)^2 + 3\left(\frac{M_{11}}{0.2d_1^3}\right)^2} \\ &= \sqrt{\left(\frac{4 \times 1000}{\pi \times 15.5^2}\right)^2 + 3\left(\frac{1155.5}{0.2 \times 15.5^3}\right)^2} = 6\text{N/mm}^2 \end{aligned} \quad (2-11)$$

因为 $\sigma_{ca} < \sigma_p$ ，所以丝杠满足强度要求。

e 螺母螺纹强度验算

因螺母材料强度低于螺杆，故只验算螺纹强度即可。

$$\text{牙根高度 } b=0.65p=0.65 \times 4=2.6\text{mm} \quad (2-12)$$

基本牙型高

$$H_1=0.5p=0.5 \times 4=2\text{mm} \quad (2-13)$$

$$\text{代入有 } \tau = \frac{F}{\pi D_p b n}$$

$$= \frac{1000}{\pi \times 20.5 \times 2.6 \times 7.75}$$

$$= 0.771\text{N/mm}^2 < \tau_p$$

$$\sigma_b = \frac{3FH_1}{\pi D_p b^2 n} \quad (2-14)$$

$$= \frac{3 \times 1000 \times 2}{\pi \times 20.5 \times 2.6^2 \times 7.75}$$

$$= 1.78\text{N/mm}^2 < \sigma_{bp}$$

$$\therefore \tau < \tau_p; \sigma_b < \sigma_{bp}$$

\therefore 满足强度条件

f 稳定性验算

螺杆最大工作长度 $l=340\text{mm}$ ，轴向载荷 $F=1000\text{N}$ ，按两端固定得 $\mu=0.5$ ，

$$i = \frac{d_1}{4} = \frac{15.4}{4} = 3.875 \quad \lambda = \frac{\mu l}{i} = \frac{0.5 \times 340}{3.875} = 43.87 \quad (2-15)$$

计算临界载荷 F_c ，可得：

$$F_c = (a - b\lambda) \times \frac{\pi d_1^2}{4} \quad (2-16)$$

$$= (461 - 2.56 \times 43.87) \times \frac{\pi \times 15.5^2}{4} = 65761.7\text{N}$$

$$\text{则 } \frac{F_c}{F} = \frac{65761.7}{1000} = 65.8 > 2.5 \quad (2-17)$$

所以该传动系统稳定性较好。

2.3.2 齿轮的选取计算

渐开线圆柱齿轮的传动速度和功率范围很大；传动效率高，一对齿轮可达 0.98~0.995；精度越高，润滑愈好，效率愈高；对中心距的敏感性好；装配和维修方便；可以进行变位切削及各种修形、修缘，从而提高传动质量；易于进

行精密加工，是齿轮传动中应用最广的传动。

已知条件：

小齿轮：模数 $m=1$ ；齿数 $Z_1=20$ ；压力角 $\alpha=20^\circ$ ；齿顶高系数 $h_a^*=1$ 顶隙系数 $c^*=0.25$

大齿轮：模数 $m=1$ ；齿数 $Z_2=34$ ；压力角 $\alpha=20^\circ$ ；齿顶高系数 $h_a^*=1$ 顶隙系数 $c^*=0.25$

求其重合度

$$i_{12} = \frac{r_2}{r_1} = \frac{34}{20} = 1.7 \quad (2-18)$$

$$a = r_1 + r_2 = 10 + 17 = 27\text{mm} \quad (2-19)$$

$$r_1 = \frac{mZ_1}{2} = \frac{1 \times 20}{2} = 10\text{mm} \quad (2-20)$$

$$r_2 = \frac{mZ_2}{2} = \frac{1 \times 34}{2} = 17\text{mm} \quad (2-21)$$

$$r_{a1} = r_1 + h_a = 10 + 1 = 11\text{mm} \quad (2-22)$$

$$r_{a2} = r_2 + h_a = 17 + 1 = 18\text{mm} \quad (2-23)$$

$$r_{b1} = r_1 \cos \alpha = 10 \times \cos 20^\circ = 9.4\text{mm} \quad (2-24)$$

$$r_{b2} = r_2 \cos \alpha = 17 \times \cos 20^\circ = 16\text{mm} \quad (2-25)$$

$$\alpha_{a1} = \arccos \frac{r_{b1}}{r_{a1}} = \arccos \frac{9.4}{11} = 31.3^\circ \quad (2-26)$$

$$\alpha_{a2} = \arccos \frac{r_{b2}}{r_{a2}} = \arccos \frac{16}{18} = 27.27^\circ \quad (2-27)$$

$$\text{则 } \varepsilon_\alpha = \frac{1}{2\pi} [Z_1 (\tan \alpha_{a1} - \tan \alpha) + Z_2 (\tan \alpha_{a2} - \tan \alpha)] \quad (2-28)$$

$$= \frac{1}{2\pi} [20 \times (\tan 31.3^\circ - \tan 20^\circ) + 34 (\tan 27.27^\circ - \tan 20^\circ)]$$

$$= \frac{1}{2\pi} [20 \times (0.608 - 0.364) + 34 \times (0.5155 - 0.364)]$$

$$= \frac{1}{2\pi} [4.88 + 5.151]$$

$$\begin{aligned} &= \frac{10.031}{2\pi} \\ &= 1.6 \end{aligned}$$

因为 $\varepsilon_\alpha = 1.6 > 1$

所以 该对齿轮能连续传动。

2.4 陶瓷零件快速成型机技术性能指标

- (1) 陶瓷零件快速成型机最大加工范围(纵向×横向×竖向):
210×270×230 (mm);
- (2) 每铺完一层料, 铺料台下降的高度为 0.1~2mm/s;
- (3) 石蜡层的凝固时间为 30s;
- (4) 加热板的温度控制在 95℃~100℃恒温。
- (5) 铺料台下降速度为 0.1~2mm/s。

2.5 陶瓷零件快速成型机整机特点

(1) 该设备体积小、重量轻、结构紧凑, 设计成本较低, 与目前市场上的快速成型设备相比, 具有成本低廉, 易于普及的特点;

(2) 该设备利用石蜡和陶瓷材料的特性, 在铺料系统中加入了加热及搅拌装置, 专用于陶瓷制件的快速成型, 是专用的陶瓷零件快速成型数控设备;

(3) 设备的铺料系统安装固定在雕刻系统工作台上, 易于拆卸, 可以有效的把去除材料和添加材料两种成型方式结合起来, 具有很高的灵活性和可操作性;

(4) 因为该设备采用了开放式数控系统, 配以精密闭环伺服驱动系统, 所以该设备成型精度较高, 成型零件可获得良好的质量和性能;

(5) 基于数控系统的开放程度好, 所以能使各种分层软件有效的在该系统中上运行, 只要把三维模型的分层轮廓数据文件转换为 PMAC 卡(下一章将重点论述)可读取的格式, 将转换好的可运行的文件下载到 PMAC 运动控制卡的缓冲区, 从而完成零件的快速成型;

(6) 设备机械构造简单, 拆卸方便, 易于维护。

2.6 本章小结

本章阐述了基于石蜡速凝特性的层合速凝快速成型技术的主要技术思想, 以及陶瓷零件快速成型机的基本动作原理, 对陶瓷零件快速成型机的铺料机械

系统作了分析，运用 PRO/E 对铺料机械系统进行了虚拟装配，得出了铺料机构的分解图，在 PRO/E 环境下，运用其 Mechanism 模块对铺料机构作了运动学分析，运算得出了速度和加速度曲线图。对该机的重要零部件进行了计算校核，最后阐明了陶瓷零件快速成型机的技术指标和整机特点。

3 控制系统的硬件结构设计

3.1 基于 PC 的开放式数控系统

如前文所述,目前可应用于陶瓷零件快速成型制造的技术很多,但大都还存在着设备昂贵,投资大,材料浪费严重以及陶瓷浆料成型控制较为困难等缺点,如大部分的陶瓷零件快速成型设备采用激光系统,制造成本很高,很难使快速成型技术在我国有效的推广。而且,大部分的快速成型设备控制系统开放性和兼容性不是很好,很多设备都属于封闭式控制系统,分层软件在这些控制平台上适应性不强,针对某一控制平台往往需要单独开发专门的分层软件,这样就大大的增加了开发的难度。随着计算机技术的不断进步,PC 技术已越来越多的应用到控制领域。考虑到 PC 具有丰富的硬件和软件资源,可以更好的满足现代控制系统的要求,开发研制了基于 PC 机为硬件平台的“IPC+PMAC”开放式数控系统。PMAC 是一种多轴运动控制器,可以实现多轴联动,而把 PC 机作为硬件和软件的开发平台,能极大的利用 PC 机固有资源。把该控制系统应用于陶瓷零件快速成型机,能够更有效的满足控制任务的要求,而且具有更大的灵活性、通用性以及无可比拟的开放性。把基于 PC 的“IPC+PMAC”开放式控制系统应用到陶瓷零件快速成型领域对于加快陶瓷零件快速成型技术的推广和产业化有着重要的意义。

3.1.1 基于 PC 的开放式数控系统的功能模式

基于的开放式数控系统目前大致可分为 PC 嵌入 NC 模式、NC 嵌入 PC 型模式和全软件型开放式数控系统这三种典型结构^[46]。

(1) PC 嵌入 NC 模式

这种结构的数控系统将 PC 作为 NC 的部件嵌入在数控系统中,用内部总线相连接,PC 和 NC 连接在一起构成前、后台结构,可形成多微处理器数控系统。它的 NC 部分仍然是传统的数控系统,用户无法介入数控系统的核心,但可利用 PC 丰富的软件资源,满足开放性要求。这类数控系统的优点是原来的 CNC 不必改动,既保持了原来 CNC 系统强大的功能,又具有数据传送速度快、系统响应时间短的特点。其缺点是不能充分发挥 PC 的潜力,开放性受到一定限制,NC 部分仍然是传统的数控系统,系统造价昂贵。这类数控系统或者提供 PC 前端接口,或者直接将 PC 母板嵌入 CNC 中。

(2) NC 嵌入 PC 型模式(基于运动控制器的开放式数控系统)

这种结构的数控系统是在通用的 PC 扩展槽中插入运动控制板或整个 CNC

单元(包括内嵌式 PLC)。PC 将实现用户接口、文件管理以及通信等非实时部分的功能,实时控制机床的运动控制盒开关量控制等由插入 PC 扩展槽中的 CNC 单元或运动控制板来承担。这种开放式数控系统目前是较为先进的。但是该系统的 CNC 核心部分—运动控制和伺服控制仍要依赖于专用运动控制卡,还未达到整个产品的硬件通用化。

(3) 全软件型开放式数控系统

全软件结构 CNC(SoftCNC)又称为纯 PC 型开放式数控系统。这种结构的开放性数控系统的特点是 CNC 的全部或大部分功能均由 PC 承担,并通过装在 PC 扩展槽中的驱动接口卡对伺服驱动进行控制。在 PC 中采用实时操作系统或对操作系统进行实时功能扩展,由 PC 完成数控系统中所有的实时任务和非实时任务,如编译、解释、插补和 PLC 等。此类系统尚不成熟。

本系统采用 NC 嵌入 PC 型模式即“IPC+PMAC”开放式控制系统。

3.2 陶瓷零件快速成型机控制系统的硬件构成

3.2.1 陶瓷零件快速成型机控制系统原理

由陶瓷零件快速成型机的机械系统结构以及控制要求可知,系统需要控制的对象主要是雕刻系统和铺料系统的各轴运动,具体可分为雕刻系统 X 轴运动单元、Z 轴运动单元、主轴运动单元、工作台 Y 轴运动单元,料斗左右水平运动单元(X1 轴),铺料平台升降运动单元(Y1 轴)以及搅拌运动单元(C1 轴 2 个),一共七根轴。基于对主控对象的考虑,本系统采用“IPC+PMAC 运动控制卡”开放式控制结构模式,即采用把 PMAC 多轴运动控制卡嵌入 IPC,工控机作为上位机和系统平台,PMAC 运动控制器作为下位机的主从式双 CPU 开放式运动控制模式。硬件部分主要有工控计算机、变频器、交流伺服驱动器、交流伺服电机、步进电机、以及伺服信号中转板、I/O 接口板等构成,控制系统结构原理图如图 3-1 所示。

该控制系统为两级主从式分布控制结构,上位机选用艾讯工控机,CPU 为 PIII1.0G,256M 内存。操作系统选用 Windows2000,主要完成系统管理、人机界面、文件管理、网络通讯、运动仿真、系统调试等功能。下位机运动控制卡采用美国 Delta Tau Data System 公司推出的 PMAC-PC 八轴运动控制卡,借助于 Motorola DSP56002 数字信号处理器,可同时控制 1~8 轴。其具有计算能力高,实时性好的优点,与一般的运动控制器相比,运算速度更快,效率更高,而且具有很强的开放性,下位机主要完成各个轴的实时伺服更新、I/O 控制和 PLC 监控等功能。上位机通过标准 ISA 总线和运动控制卡实现数据通讯。PMAC-PC

与伺服驱动器，电机以及变频器的通过ACC-8D伺服信号中转板交换信息，因为ACC-8D伺服信号中转板是两轴输出板，而系统需要控制七根轴，故采用4块这种信号中转板。为了使控制系统有很好的控制精度，拟采用交流伺服系统来控制铺料系统和雕刻系统，交流伺服电机全部选用日本富士公司生产的伺服驱动器和伺服电机，电机上带有17位增量式编码器反馈，在工作台上配备光栅尺，从而形成闭环控制系统。成型机的控制面板和其它辅助单元和I/O开关信号可以方便地与PMAC-PC的I/O接口模块连接。

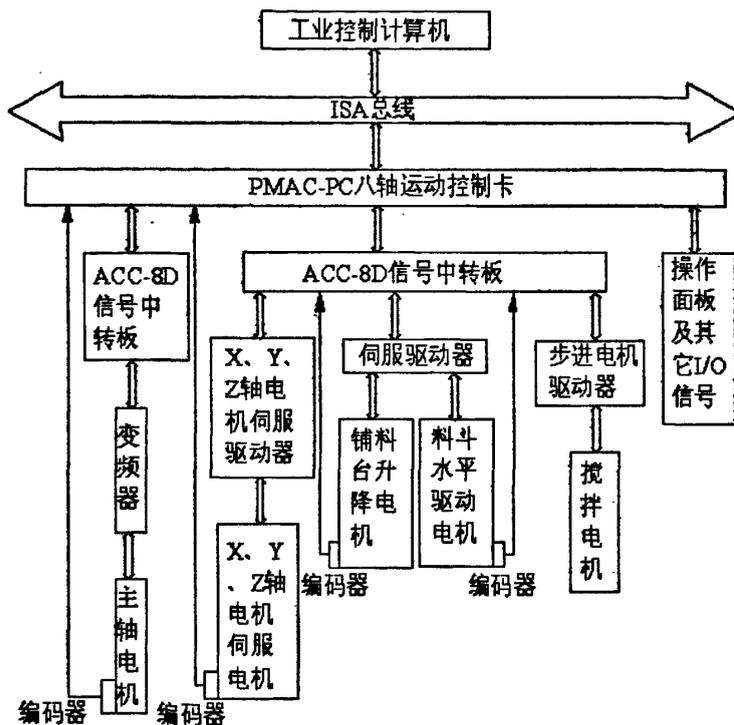


图 3-1 陶瓷零件快速成型机制系统原理图

Fig.3-1 Control system of the machine tool about rapid prototyping manufacturing for ceramic parts

雕刻成型系统的交流伺服系统由交流伺服电机驱动器、交流伺服电机、主轴电机和传动导向机构以及主轴组成，通过伺服信号中转板将运动控制卡的模拟电压速度控制信号转换成雕刻机构的机械运动，在铺设好的凝固的石蜡层上雕刻出CAD模型的每一层模型形状。

铺料系统中，交流伺服电机驱动器、交流伺服电机、铺料平台升降机构以及料斗水平运动机构组成铺料系统的执行机构，通过ACC-8D伺服信号中转板将运动控制卡发出的ASCII码指令转换成控制步进电机的脉宽调制信号(PWM)

信号),控制铺料机构完成石蜡和陶瓷浆料的铺设。而搅拌机构只需采用 PMAC 卡控制两个普通的步进电机即可完成。

3.3 PMAC 可编程多轴运动控制卡

PMAC (Programmable Multi-axes Controller) 可编程多轴运动控制器是美国 Delta Tau Data System 公司的产品系列。它可以通过灵活的高级语言最多控制八轴同时运动。它全面开发了功能强大的数字信号处理器 DSP, PMAC 的核心 CPU 为 Motorola 的 DSP 数字信号处理器, 它处理了所有八轴的运算。它具有计算能力高, 实时性好的优点, 与一般的运动控制器相比, 运算速度更快, 效率更高, 而且具有很强的开放性。最多可以有 16 片 PMAC 板完全同步的联系到一起使用, 控制总共 128 根轴的联动和独立运动, 它具有四种硬件形式: PMAC-PC、PMAC-LITE、PMAC-VME、PMAC-STD。

本文选用 PMAC-PC 型运动控制卡。

3.3.1 PMAC 应用领域

PMAC 作为一种广泛用途的控制器, 能应用于各种各样的设备, 从那些精密到小于百万分之一英寸的精密仪器到那些需要数百千瓦或马力的大型设备。它的多种用途包括机器人、机床、纸和木材的加工作业, 装配线、食品加工、印刷、包装、物料装卸、摄像机控制、自动焊接、硅片加工、激光切割和许多别的方面。

3.3.2 PMAC 运动控制卡的功能

PMAC 实质上就是一台完整的计算机, 它不仅能够运行存储在其内部存储器中的运动程序, 而且还能够进行实时的, 多任务处理。它不仅能够自动的对任务进行优先等级判别, 从而使具有高的优先等级任务比具有低的优先等级任务能够先被执行。在许多应用中, PMAC 能够同时执行多个任务, 并能有正确的进行优先级排序的能力, 使它能够在处理时间和任务切换的复杂性这两个方面大大减轻主机和它的编程器的负担。PMAC 既可以以脱机的方式运行, 又可以通过串口或总线接口用一台主机来控制它运行。

其主要功能有^[47]:

(1) 执行运动程序

当被告知执行一个运动程序时, PMAC 一次执行程序的一个指令, 进行该移动命令(包括非移动的任务的)所有计算, 从而为该运动的实际执行做好准备。PMAC 总是工作在实际移动之前, 如果需要, 它总能正确地与即将执行的动作相调和。

(2) 执行 PLC 程序

运动程序的顺序特性使得它能很好地适应一系列的运动并相互协调其它坐标系的动作。然而，当在执行那些不是用运动的顺序来直接协调的动作时，这些程序就不适于做坐标系的运动。对于这些类型的任务，PMAC 提供给用户编写“PLC 程序”的能力。这些程序对于在运动顺序上不同步的任务是非常有用的。

(3) 伺服环更新

对于每一个电机，都以一个固定频率（通常为 2KMHZ 左右）对其进行伺服更新。伺服更新工作进程是：先根据运动程序或别的运动命令得到的等式求得要求的位置增量，然后将此与由反馈传感器读回的实际位置相比较，最后在两者之差的基础上，发出一个输出命令使此差值变小，如此反复，直到此差值在允许的范围内为止。

(4) 换相更新

对于一台多相电机，PMAC 自动地以一个固定的频率（通常 9KHZ 左右）进行换相更新。换相更新，就是测量并估算转子磁场方向，然后再分配通过分布在电机的不同相位的伺服更新算出的命令。

(5) 与主机通信

PMAC 可以在任何时间与主机通信，甚至在一个运动序列中间。PMAC 接受一个命令，然后采取相应的动作，将命令放入一个程序缓冲区以便以后执行，提供数据以响应主机，开始电机的移动等。如果命令是非法的，它将会向主机报错。

(6) 任务优先级

任务是按照优先级电路组织起来的，这样可以使它们能够得以最优化，从而让程序能有效、安全地运行。当优先级确定以后，不同任务的执行频率可由程序员自己控制。

3.3.3 PMAC 运动控制卡的开放功能

(1) 可与不同的伺服系统连接

PMAC 可通过参数设置和接口卡与各种模拟或数字的交、直流有刷、直流无刷伺服电机驱动器和直流电机、交流异步电机、步进电机等相连，构成数控系统的交流伺服驱动部分。

(2) 与各种检测元件的匹配

PMAC 可与各种检测元件进行匹配，包括增量编码器、绝对编码器、光栅、旋转编码器等。

(3) 与上位机的通信方式

PMAC 可通过串行方式、总线方式、双端口 RAM(DPRAM)这三种方式与上位机进行通讯。

(4) 人机界面的对外开放

可以用高级编程语言如 VC、VB、Delphi 等编程语言调用 PMAC 下的动态链接库 PCOMM，实现 Windows 环境下的人机界面。

(5) 功能的对外开放

内含可编程逻辑控制器 PLC。所有的 I/O 点都以软件来控制的，只要使用一个类似高级程序中的指针变量指向某一 I/O 地址，就可以在和程序中通过该指针变量来方便地对该 I/O 点进行输入或输出控制。

(6) 数控功能的开放性

PMAC 提供了一套基本功能指令集合，如直线插补、圆弧插补、样条曲线插补、增量或绝对方式运行等，用户可在这些基本指令基础上定制用户自己的代码、代码数控功能。

3.3.4 PMAC-PC 运动控制卡

PMAC-PC 是 PMAC 可编程多轴运动控制器系列中的一种，其有着强大的运算和处理能力，PMAC 的核心 CPU 为 Motorola 的 DSP56002 数字信号处理器，它处理了所有八轴的运算，可以进行 1~8 轴的控制。在板轴接口电路可以达到四个硬件通道或者八个硬件通道。PMAC-PC 是全排列 ISA 总线扩展板。可以通过 ISA 总线与主机通信，也可用可选的双端口 RAM，当它脱机使用时可以由 RS-322 或者 RS-422 系列端口来完成与上位机的通信。

PMAC-PC 具有双端口 RAM (也即 DPRAM)，双端口 RAM 通过共享存储为总线和主机实现通信提供了非常高速的

通信路径。如果每秒有超过 100 个的数据项目需要在运动控制卡和主机之间交换，那么就应该采用 DPRAM。PMAC-PC 的外观如图 3-2 所示。

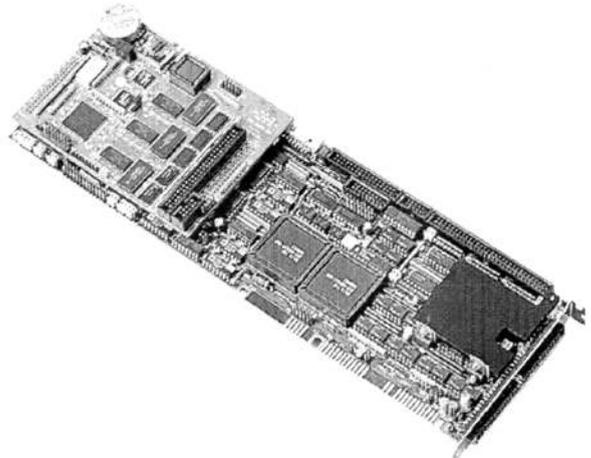


图 3-2 PMAC-PC 运动控制卡

Fig.3-2 Programmable Multi-axes Controller

3.3.5 PMAC-PC 运动控制卡性能参数

PMAC-PC 运动控制卡可以实现八轴的联动，其性能参数如下：

- (1) 20MHZ DSP56002 CPU
- (2) 128KX24 RAM 用户内存
- (3) 128KX28 闪存进行用户备份和固件程序
- (4) 2kx8 EEPROM 用于设置可变备份
- (5) RS-422 系列接口，ISA(PC)总线接口
- (6) 4 通道轴接口电路，每一个包括：
 - ①16 位+/-10V 模拟量输出
 - ②3 路微分编码器输出
 - ③4 个标志信号输入，2 个标志信号输出
- (7) 接口可用于扩展 16 位系列 ADC
- (8) 直接的 I/O 接口电路
- (9) PID/前端反馈伺服算法

3.3.6 硬件结构及其接口

系统主要 PMAC-PC 模块有运动控制模块，数字量输入输出模块，以及 A/D、D/A 转换模块等。运动控制模块主要是用来和交流伺服控制器连接，实现机床的插补运算等，而数字量输入输出模块主要实现限位开关，控制面板等的通讯，A/D、D/A 转换模块可以完成编码器，传感器，光栅尺等的数据转换。

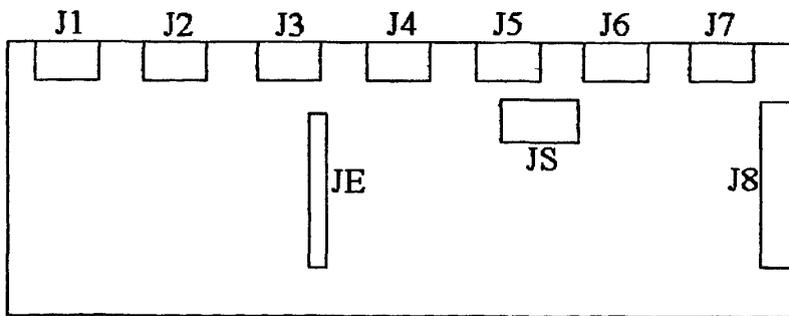


图 3-3 PMAC-PC 的硬件结构

Fig.3-3 Hardware structure of PMAC-PC

PMAC-PC 的硬件结构如图 3-3 所示，其主要接口功能为：

J1(JDSIP)口：显示器插槽，可接显示器以显示加工过程。它还可接附件 ACC-12 或者 ACC-12A 进行液晶显示或真空显示。在运动或 PLC 程序的运行

中，使用 DISPLAY 命令可以在这些显示器上显示文本和变量值。

J2 (JPAN) 口：为控制面板上的 I/O 接口，它是一个 26 针的接口，包括专用控制输入、专用指示输出、一个正交编码器和一个模拟输入，作为控制板插槽，J2 可外接一个控制板。其除了在控制板禁用功能变量 I2=1 的情况下都具有预定义功能。

J3 (JTHM)：为手轮接入的插槽，可接入脉冲发生器，JTHM 接口上的多路拨码开关口有 8 根输入线和 8 根输出线，其中的输出线可用来进行大量的输入和输出。

J4 (JRS422 或 JRS232)：为 RS-232/RS-422 接入插槽，可与其他计算机进行通信。

J5 (JOPTO) 口：I/O 接入的插槽，可接入输入输出变量，该接口提供了 8 个普通用途的数字输入和 8 个普通用途的数字输出。在相对的列上每个输入和输出应都有它自己的响应地。

槽，可外接数字 I/O 扩展卡，双端口 RAM。

J6 为 PMAC 扩展卡的插槽。

J8、J7 (JMACH1、JMACH2) 口：JMACH1 包括了四通道的机床 I/O 口：模拟量输出，增量编码器输入，关联输入和输出信号，外加电源供给联接。JMACH2 的 1~4 轴接口必须和 JMACH1 一致。可控制电机及连接编码器输入。

JE：PMAC 扩展卡插和 PMAC 的扩展卡等。

JS：16 位 A/D 输入接口插槽。其串行的数字输入信号来源于 16 位 A/D 转换器的 4 或 8 通道。

3.4 伺服系统的选择

伺服系统是数控系统中的一个重要的硬件组成部分，伺服系统的性能直接影响到机床的加工精度，一般来说，把足够的位置控制精度和响应速度作为它的控制目标，要求伺服系统在短的时间内能够实现快速响应。而且，作为控制系统重要的性能指标之一的超调量必须在规定的范围内，要求伺服系统能够实现快速的定位，能够实现瞬时起停，频繁换向等功能。

伺服系统的控制方式按控制方式划分，有开环伺服系统、闭环伺服系统和半闭环伺服系统等。实际上数控系统也分成开环数控系统、闭环数控系统和半闭环数控系统三种类型，与伺服系统这三种方式相关。

(1) 开环伺服系统

此系统中没有位置检测装置，信号流是单向的，故系统稳定性好。一般来

说，它以步进电机作为伺服驱动元件，无位置反馈，精度相对比闭环来说不高，故机床运动精度取决于伺服驱动电机和机械传动机构的性能和精度。步进电机步距角误差、齿轮副、丝杠螺母副的传动误差都会影响零件的精度，所以，一般用于经济型数控机床。

(2) 闭环伺服系统

系统有反馈控制系统，位置检测装置安装在工作台上，可直接对最终运动部件的实际位置进行检测，能得到更高的速度和精度。常见的检测元件有旋转变压器、感应同步器、光栅、磁栅和编码器等。理论上闭环系统可以消除整个驱动和传动环节的误差，具有很高的精度。但是由于位置环内的许多机械传动环节的摩擦特性、刚性和间隙都是非线性的，故容易造成系统的不稳定。闭环伺服系统多用在控制精度要求较高的场合。

(3) 半闭环伺服系统

系统的位置采样点从伺服电机或者丝杠的端部引出，采样旋转角度进行检测，不直接测量最终运动部件的实际位置。由于电机轴端和被控对象之间传动误差的存在，所以半闭环伺服系统的精度要比闭环伺服系统的精度低一些。

通过对控制系统要求的分析，为了使控制系统具有更高的精度，陶瓷零件快速成型机交流伺服系统采用双闭环也即双反馈的控制形式。虽然闭环系统具有不稳定性，但是我们可以用 PMAC 卡中的 PID 整定功能来使整个控制系统具有更好的动态和静态性能，其组成结构如图 3-4 所示。

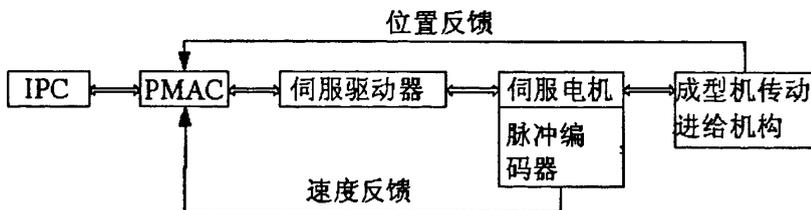


图 3-4 伺服系统结构原理

Fig.3-4 Principle of servo system

交流伺服系统主要有工控机，PMAC 运动控制卡，交流伺服驱动器，交流伺服电机和各种位置检测装置以及成型机构等组成。其动作原理是工控机首先发出位置指令给 PMAC，再通过 PMAC 运动控制器发送控制信号给交流伺服驱动器，然后由驱动器驱动电机转动。在此系统中，伺服电机轴无负载端侧带有增量式脉冲编码器，可进行速度检测，检测信号通过速度反馈环节给 PMAC，从而形成速度环。通过在成型机进给机构上设置位置检测元件，如光栅尺、感

应同步器（电栅）、磁致伸缩传感器等进行位置检测，此处选用光栅尺。位置控制模块，速度控制控制单元、位置检测单元和位置反馈控制就形成了位置环。这样，就实现了机床坐标轴的有效位置控制。

3.5 检测元件的选择

检测元件是伺服系统的重要组成部分。数控装置通过接收接收传感与检测系统反馈的信息，与数控系统发出的指令信息进行相应的比较、处理、运算，逐步调整它们之间的偏差，使其偏差为零。从而实现相应的控制功能。PMAC可接收常用的检测元件包括光电编码器、旋转变压器、感应同步器（电栅）、光栅、磁栅、激光干涉仪、磁致伸缩传感器等的反馈信号，并进行相应的处理运算。依据陶瓷零件快速成型机的控制系统要求。选用 17 位的增量式光电编码器进行速度的检测和反馈，选用光栅尺进行位移的反馈。

3.6 变频器的选择

目前，数控机床可以分为手动调速和无级变速这两种方式，很多功能强大的数控机床大都采用无级变速的方式。无级变速系统主要有变频主轴驱动系统和伺服驱动主轴系统两种。一般采用直流或者交流电机，通过带传动或带动主轴箱内的减速齿轮带动主轴旋转。由于本课题研究开发的陶瓷零件快成型机主轴需无级调速功能，而变频器变频调速效率较高，能够实现平滑的无级调速，有良好的启动和制动功能，具有高性价比还可以简化结构，故采用交流变频主轴驱动系统，可选用普通的异步交流电动机作为主轴驱动电动机，选用编码器进行速度的反馈。

选用的变频器型号为台达 M 系列中的 VFD-007M23，其性能能够满足机床实现无级变速的要求，其性能特点为控制信号为正弦波 SPWM（提供速度反馈矢量控制），控制性能较 V/F 控制方式有很大改善，特别是在低速转距上满足机床主轴的要求，5HZ 时起动转矩能达到 150%以上；载波频率范围 0-15KHZ，噪音小；提供标准的 0-10V 模拟量接口，能够与大多数数控系统接口兼容，通用性强，过负载能力强；提供多功能的输出端子信号，例如零信号，运转中信号，速度到达信号，故障指示，满足系统对于主轴速度状态的监控；自动转距补偿，满足机床主轴在低速情况下的加工需求；电机参数自动整定功能，能够在线识别参数，保证系统的稳定性和精确性。图 3-5 为主轴变频器控制系统电气硬件连接图。

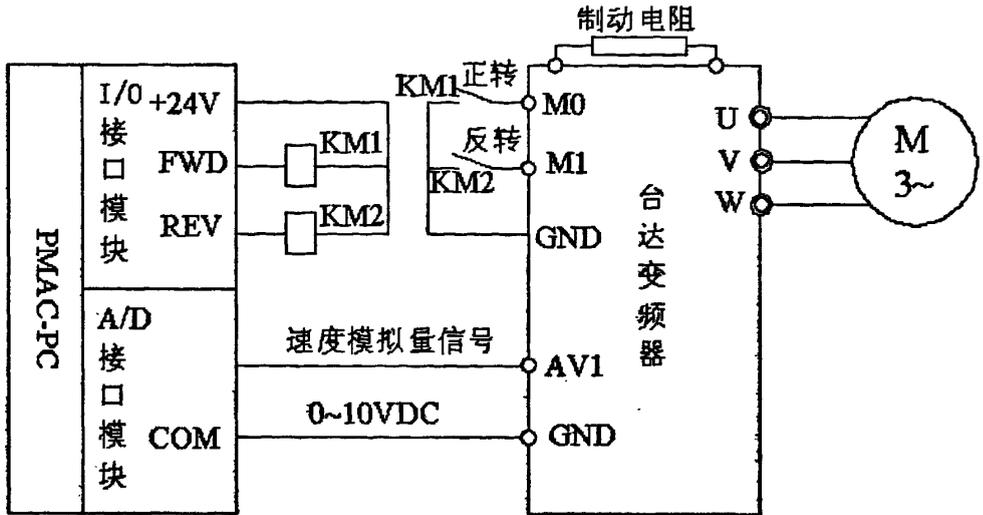


图 3-5 主轴变频调速电路接线图

Fig.3-5 spindle frequency control key wiring

陶瓷零件快速成型机控制系统选用的主要接口功能如下：

变频器 AV1/GND 接口端子用于向 PMAC 提供速度模拟量指令，AV1 接数控系统模拟量接口正信号，GND 接负信号，信号为 0-10V 模拟电压信号，控制主轴转速。

M0/M1/GND 为变频器正转/反转信号端子，由数控系统发出正转信号 FWD 或者反转信号 REV 来驱动中间继电器，中间继电器的常开触点接入变频器 M0/GND 和 M1/GND，从而控制机床主轴的正反转。

其中，端口 AV1/GND 和 PMAC 运动控制卡的 D/A 输出通道模块相接，用于速度模拟量信号的交换，而 PMAC 运动控制卡通过其 I/O 模块发出正反转信号来驱动中间继电器。

3.7 系统控制方式的选择

驱动器与交流伺服电机构成闭环控制系统，提供位置控制、速度控制、转矩控制三种控制方式^[51]。数控系统中对本系统执行机构的运动速度和执行速度进行控制，可以通过对交流伺服电机进行速度和位置控制。此三种控制方式分别通过脉冲指令、模拟量指令、转矩指令对伺服电机进行控制。

(1) 位置控制 交流伺服电机位置控制系统分为全闭环系统和半闭环系统。全闭环系统通常是通过在需要定位的执行机构上安装位置传感器进行位置检测和反馈控制，半闭环控制系统主要通过安装在电机的非负载轴端安装位置传感

器，通过测量交流伺服电机轴的转角，间接测量执行机构的位移。

(2) 速度控制 为了满足系统要求，控制系统对交流伺服电机的速度加以控制。

(3) 转矩控制 转矩控制主要是在对交流伺服电机有转矩要求，而对速度和位置没有要求的场合下使用的控制形式。转矩指令也可以称为电流指令，转矩控制的实质是对电流进行控制。

(4) 复合控制方式 此控制方式采用先位置控制，后速度控制，或者先速度，后转矩的控制方式。

基于对控制系统的要求，对交流伺服电机采用位置控制方式。富士伺服交流电机 GYS500DC2-T2A 自身带有高分辨率的 17 位（131072 脉冲）编码器，能够满足位置控制的要求。其交流伺服系统控制模式接口接线图如图 3-6 所示。

其主要功能如下：

控制端子 CN1 用于接受控制指令以及数字 I/O 信号，编码器输出等；控制端子 CN2 用于接受编码器反馈；CN3A、CN3B 为通讯接口（同上位机以及驱动器之间通讯）；CN4 为模拟量监视输出。

P24、M24 用于为驱动器控制电路提供 DC24V 电源；

CONT1 的功能为：如果该端子和控制电源地（M24）相连，则伺服驱动器将允许工作，如果断开，则驱动器禁止输出。该信号已做连接，用于急停按钮（此端子功能由伺服驱动器参数定义，缺省定义为伺服 ON）；

CA、*CA、CB、*CB：本端子用于位置控制时的信号输入（脉冲及方向号）；

Vref、M5 用于控制信号输入，本端子用于速度控制或转矩控制时的信号输入；FFA、*FFA、FFB、*FFB、FFZ、*FFZ 为编码器脉冲输出端，富士伺服驱动器可以将码盘反馈回来的脉冲信号同步的发送给其它的控制器的，本控制系统采用了这种接法，可以将反馈的脉冲同时送到驱动器和 PMAC 控制卡中。

CN2 端子为富士伺服电机码盘反馈信号输入端。

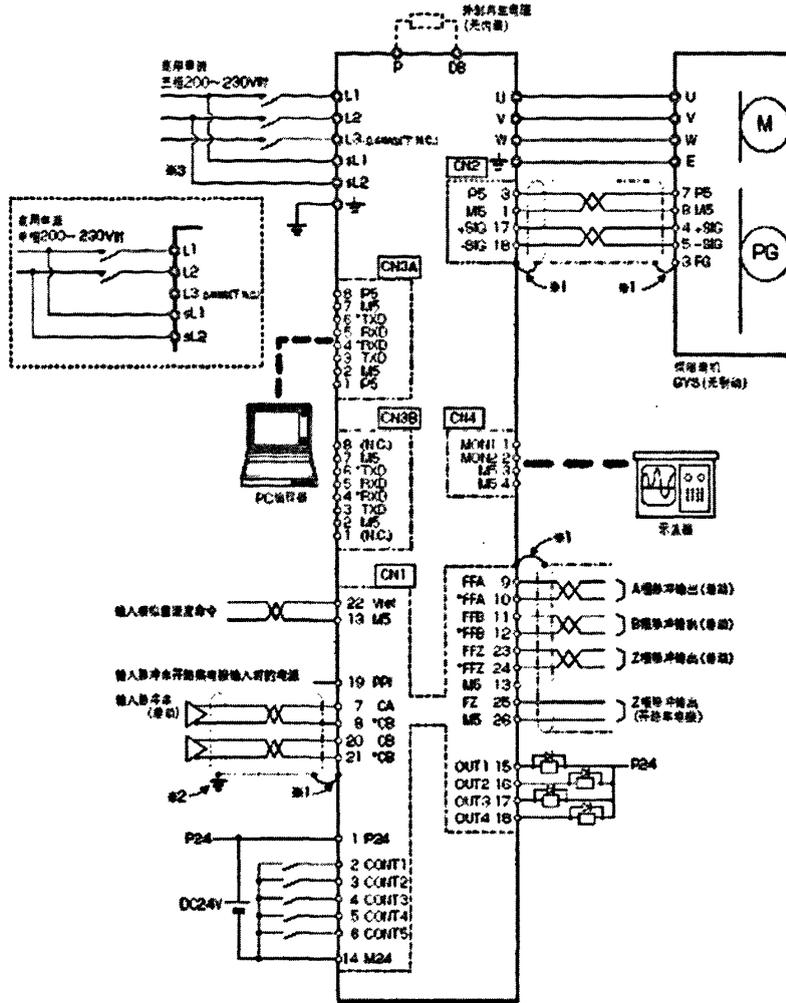


图 3-6 交流伺服系统控制模式

Fig.3-6 Alternating current servo system

3.8 伺服电机的选取 [52,53]

以陶瓷零件快速成型机工作台水平方向的步进电机为例，介绍交流伺服电机的选取，其它交流伺服电机选取方法与此类似。

已知条件为：拖动部分质量： $W=50\text{ kg}$ ，时间常数： $t_a=1000\text{ ms}$ ，丝杠螺距： $P=4\text{ mm}$ ，铺料平台快速进给速度为 15 m/min 。

(1) 作用在丝杠副上各种转矩的计算

一般机床丝杠轴向外加工作载荷主要是丝杠轴向外加载荷和导轨摩擦阻力合成力矩。现在考虑一般切削的情况，外加载荷产生的摩擦力矩为：

$$F = F_x + F_f = F_x + f \cdot (W + F_z) = 900 + 0.009 \times (500 + 700) = 910.8N$$

F_x 为X方向切削力, F_z 为Z方向切削力

其中:摩擦系数 $f = 0.009$,丝杠副效率取 $\eta = 0.8$

$$T_F = \frac{FP}{2\pi\eta} \times 10^{-3} \approx 0.725N \cdot m$$

其中:摩擦系数 $f = 0.09$,丝杠副效率取 $\eta = 0.8$,滚珠丝杠导程 $P = 4mm$

由于所采用的是普通滑动丝杠,故认为作用在丝杠副所产生的预紧力矩为
 $T_p = 0$ 。

(2) 负荷转动惯量 $J_L(kg \cdot m^2)$ 及传动系统转动惯量 $J(kg \cdot m^2)$ 的计算

$$J_L = \sum j_i \left(\frac{n_i}{n_m}\right)^2 + \sum m_j \left(\frac{V_j}{2\pi n_m}\right)^2 \quad (3-1)$$

$$J = J_m + J_L \quad (3-2)$$

式中: J_i, n_i - 各旋转件的转动惯量 ($kg \cdot m^2$) 和转速 (r/min)

m_j, V_j - 各直线运动件的质量(kg)和速度(m/min)

J_m, n_m - 电机的转动惯量($kg \cdot m^2$)和转速(r/min)

$$J_i = \frac{\pi\gamma}{32} D^4 L \quad (3-3)$$

$$= \frac{3.14}{32} \times 7.8 \times 10^{-3} \times 1.8^4 \times 34$$

$$= 0.2732 Kg \cdot cm^2$$

$$J_L = 0.2732 + 1.5 \times \left(\frac{15}{2\pi \times 3000}\right)^2 \approx 0.2832 \times 10^{-4} kg \cdot m^2 \quad (3-4)$$

$$J_m \geq \frac{J_L}{3} \approx 0.0944 \times 10^{-4} kg \cdot m^2$$

初选电机为富士交流伺服电机系列中的 GYS401DC2-T2A, 其额定转矩为 $1.27 N \cdot m$, 最大转矩为 $3.82 N \cdot m$, 转动惯量为 $0.246 \times 10^{-4} kg \cdot m^2$ 。

则传动系统转动惯量 $J = J_m + J_L = (0.246 + 0.2832) \times 10^{-4} = 0.529 \times 10^{-4} kg \cdot m^2$ 。

(3) 加速度转矩 T_a 及最大加速度转矩 T_{am} 的计算

当电机转速从 n_1 升至 n_2 时:

$$T_a = J \frac{2\pi(n_1 - n_2)}{60t_a} \quad (3-5)$$

当电机从静止升至 n_{max} 时:

$$T_{am} = J \frac{2\pi n_{max}}{60t_a} \tag{3-6}$$

式中：n 为电机转速(r/min)

n_{max} 为电机最高转速(r/min)

t_a 为加速度时间 (s)

$$T_{am} = J \frac{2\pi n_{max}}{60t_a} = 0.5292 \times 10^{-4} \times \frac{2\pi \times 5000}{60 \times 0.1} \approx 0.2769 \text{kg} \cdot \text{m} = 2.769 \text{N} \cdot \text{m}$$

(4) 电机的最大启动转矩

$$Tr = T_{am} + (T_F + T_p)$$

$$T_r = 2.769 + 0.725 = 3.496 \text{N} \cdot \text{m}$$

$T_r = 3.496 \leq 3.82 \text{N} \cdot \text{m}$ (初选电机的最大转矩)，符合要求。

(5) 电机连续工作的最大转矩

机械在最大载荷下连续均匀运转时的电机转矩为：

$$T_M = T_F + T_p$$

$T_M = 0.725 \text{N} \cdot \text{m} \leq 1.27 \text{N} \cdot \text{m}$ (电机的额定转矩)，符合要求。

最终确定电机的型号为 GYS401DC2-T2A-B，输出功率为 0.4KW,相应的伺服驱动器选择与电机匹配的型号为 RYC401D3-VVT2。

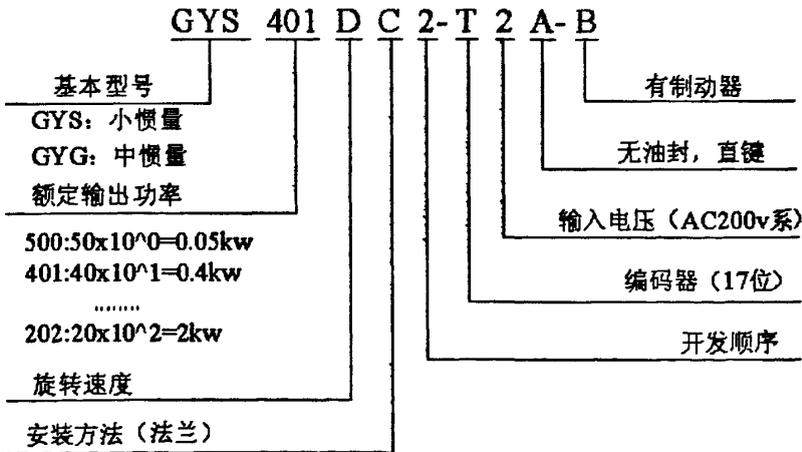


图 3-7 富士交流伺服电机选型说明

Fig.3-7 FJ servo motor model codes

图 3-7 为富士交流伺服电机的型号代码选型说明，电机的技术参数如表 3-1 所示。

富士伺服交流电机 GYS401DC2-T2A 带有高分辨率的 17 位(131072 脉冲)编码器,能够实现低速平稳运行,同时伺服系统标准配备了减振控制功能,能够最大限度的抑制机械振动,标准还配备了 RS-485 两个通信接口,具有试运行和监控等功能。

表 3-1 GYS401DC2-T2A 型富士伺服交流电机技术参数

额定功率 (KW)	额定转矩 (N · m)	最大转矩 (N · m)	额定转速 (r/min)	最高转速 (r/min)	转动惯量 ($kg \cdot m^2$)
0.4	1.27	3.82	3000	5000	0.246×10^{-4}

3.9 陶瓷零件快速成型机接线原理图

陶瓷零件快速成型机硬件系统的搭建包括 IPC 与 PMAC 卡的连接, PMAC 卡与伺服驱动器、PMAC 卡与编码器、光栅尺等检测装置、伺服驱动器与电机的连接等等。图 3-8 为陶瓷零件快速成型机控制系统的接线原理图。其中 CHX 代表电机的反馈编码器输入通道,每个电机有 A、B、C 三相脉冲输入到 PMAC 卡中; GND 对应编码器数字信号输入电源地; DACX 口为 PMAC 卡输出模拟命令到伺服电机驱动器通道, AGND 为模拟量公共地输入端, GND 为公共数字地; \pm LIM 为极限开关接口; HMFL 为回零标志输入; AENA 和 DIR 对应放大使能信号和错误输入;

下面就各个连接进行具体分析说明。

(1) 连接主机

通过工控机上的 ISA 总线插槽实现主机和 PMAC-PC 的连接,总线为 PMAC-PC 提供+5V 的电源。

(2) 连接模拟电源

由于 PMAC 的模拟输出电路与数字电路隔离,因此,需要单独的电源供应。可以接在 JMCH 接口。+15V 接在 59 针 (A+15V), -15V 接在 60 针 (A-15V) 上,模拟的公共地接在 58 (AGND) 针上。典型的,这种电源供应来自伺服放大器,市场上许多这种放大器有这种电源供应。ACC-2X 为 $\pm 15V$ 电源供应提供了不同的选择。即使是另外单独供电,模拟的公共地 (AGND) 也应该接在放大器公共地端。

(3) 增量编码器连接

每个 JMACH 接线口为编码器提供了两个+5V 的输出和两个逻辑地。针 1 和针

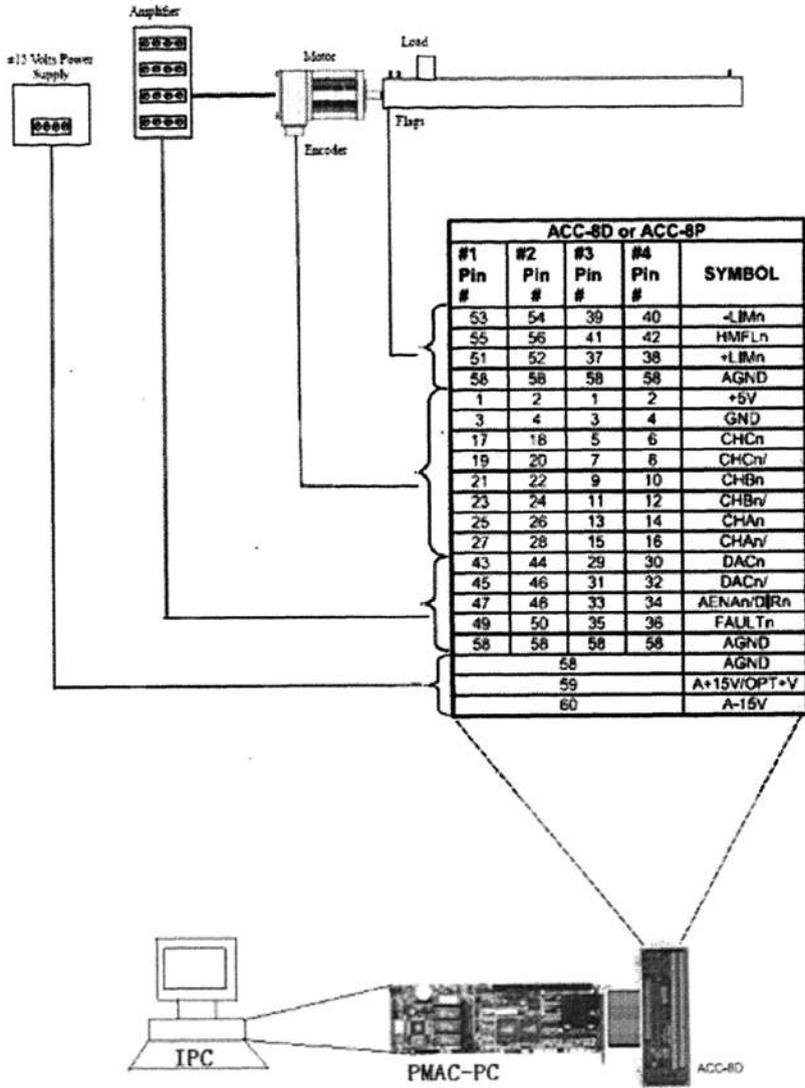


图 3-8 控制系统接线原理图

Fig.3-8 Principle of control system

2 接+5V 的输出, 针 3 和针 4 接两个逻辑地。PMAC 如果是接收单端输入编码器信号, 扩展信号针悬空, 并检查 E18~E21 和 E24~E27 跳线设置。对于差动编码器, 连接扩展信号线针 27 (CHA1) 和针 23 (CHB1)。第三通道 (检索脉冲) 是可选的, 对于 1 号编码器来说, 针 17 为 CHC1, 针 19 为 CH1。图 3-9 为差动编码器连接 PMAC 第一通道示意图。

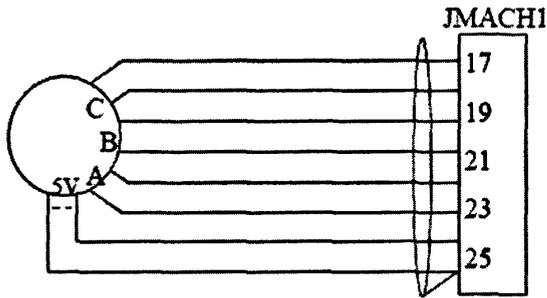


图 3-9 第一通道与编码器接线图

Fig3-9 Connection principle between encoder and first channel of PMAC

(4) 光栅尺连接

J6 为 PMAC 扩展卡的插槽，其为 10 针 I/O 接口，通过该跳线 PMAC 可以接受检测元件的传感信号，利用它实现与光栅尺连接。

3.10 陶瓷零件快速成型机接线图

附录 A 为陶瓷零件快速成型机的系统接线图。由于各个轴的接线基本类似，在此，只给出工作台 X 向和 Y 向进给系统的硬件接线图。其主要可以实现两工作台的联动，单独运动，自动以及手动操作工作台；PC 机通过 JRS-232 控制 PMAC，其可以下载程序到 PMAC 上脱机控制；能够实现双向限位控制和回原点控制等。J5 口中的 J+和 J-为手动工作台的前进和后退；JMCH 口中的 CHAX、CHAX/（X=1 或 2）为编码器脉冲输出端，用以反馈信号到 PMAC 卡中进行处理运算。通过 PMAC 卡的 J3 口控制陶瓷零件快速成型机控制系统的开关量控制、控制方式的选择，系统状态显示控制等。

3.11 PMAC 卡内存及 I/O 地址

PMAC 卡其中的一个特点是具有很强的开放性。PMAC 卡 CPU 采用 Motorola 的 DSP56002 数字信号处理器，DSP56002 具有双数据总线，每条数据线通向双 16 位的地址空间（内存具有双 16 位地址空间），0000H-FFFFH。其中一条总线和地址空间称为 X 列存储器地址，另一条总线和地址空间称为 Y 列存储器地址。在指定地址单元时，必须指出是使用 X 列存储器地址还是 Y 列存储器地址或者两列存储器地址均用。编程时既可以自己指定变量存储地址也可以用系统变量。PMAC 卡内存地址分配图如图 3-11 所示。

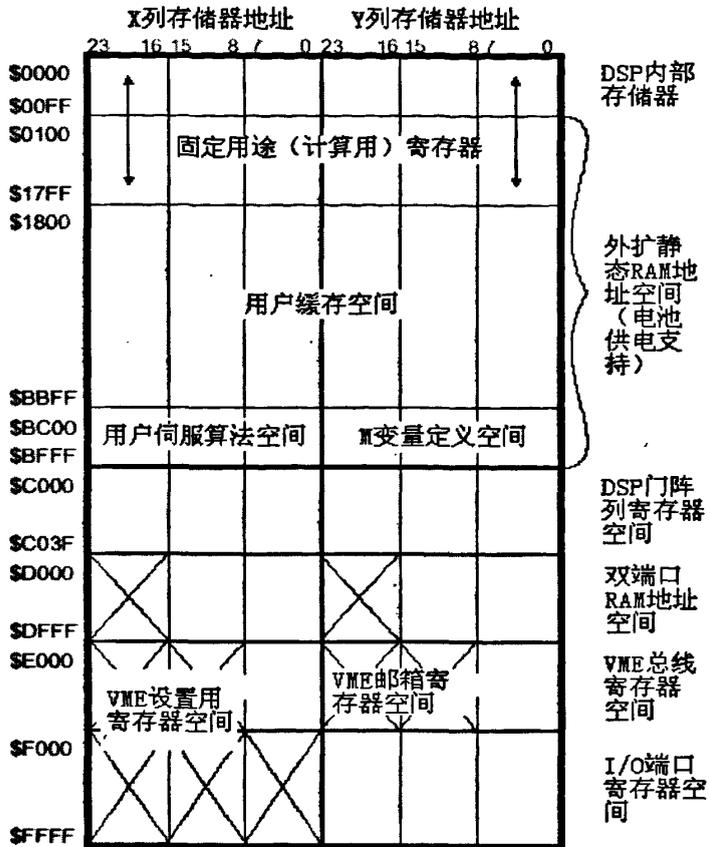


图 3-11PMAC 卡内存地址分配图

Fig.3-11 PMAC memory mapping

3.12 本章小结

本章首先介绍了开放式数控系统的几种典型的结构，提出了把“IPC+PMAC”开放式控制系统模式应用陶瓷零件快速机，分析了陶瓷零件快速成型机数控系统的硬件组成，然后重点介绍了 PMAC 运动控制卡和交流伺服系统，对主轴变频器和伺服电机等做了计算选取。在此基础上，给出了 PMAC 与伺服控制系统以及编码器等检测元件的电路连接图。最后，还介绍了 PMAC 卡的内存以及 I/O 原理。

4 伺服系统建模与仿真

4.1 伺服系统数学模型的建立

快速成型机交流伺服进给系统作为陶瓷零件快速成型机最重要的组成部分,其性能的优劣和伺服精度的高低直接影响到快速成型机的加工精度。因此,这就要求成型机交流伺服系统不仅要定位精度高,跟踪指令信号响应快,而且稳定性要好。可以看出,研究交流进给系统的伺服精度很重要,因此,本文以陶瓷零件快速成型机交流伺服进给系统为例,分析讨论其伺服精度和控制系统稳定性问题,并在此基础上讨论如何改进伺服系统的性能,提高伺服精度,使之更好的满足实际加工的需要。

由第三章所述陶瓷零件快速成型机陶瓷零件快速成型机的结构和控制要求可知,伺服控制系统的控制系统原理图如图 4-1 所示:

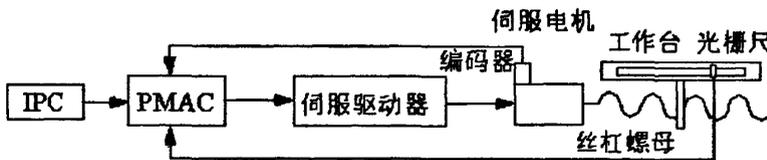


图 4-1 伺服系统控制原理图

Fig.4-1 Principle of servo control system

由陶瓷零件快速成型机伺服控制系统的控制系统原理以及结构,可以得到简化的动态模型,如图 4-2 所示:

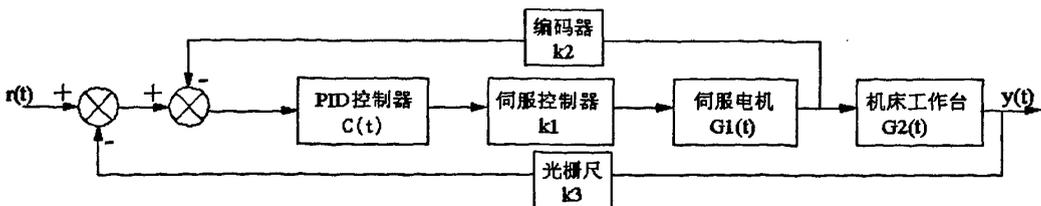


图 4-2 伺服控制系统简化动态模型

Fig.4-2 Simplify dynamic model of Servo control system

$r(t)$:系统输入信号;

$y(t)$:系统输出信号;

$C(t)$ 、 $G_1(t)$ 、 $G_2(t)$ 、 K_1 、 K_2 、 K_3 :系统中各环节传递函数。

因此, 下一步就要求解出各环节传递函数, 然后进行 PID 参数的调节。

4.1.1 工作台数学模型

陶瓷零件快速成型机的工作台可以简化为弹簧-质量-阻尼唯一系统, 如图 4-3 所示, 作为在力作用在质量上的单自由度系统, 质量 m 在外力 $f(t)$ 作用下的运动方程式为:

$$m \frac{d^2 x(t)}{dt^2} + c \frac{dx(t)}{dt} + kx(t) = f(t) \quad (4-1)$$

式中:

m ——工作台质量, 15kg

c ——粘性阻尼系数

k ——工作台弹性系数

经过拉普拉斯变换可知:

$$f(s) = \frac{x(s)}{ms^2 + cs + k} \quad (4-2)$$

$$G(s) = \frac{f(s)}{x(s)} = \frac{1}{ms^2 + cs + k} \quad (4-3)$$

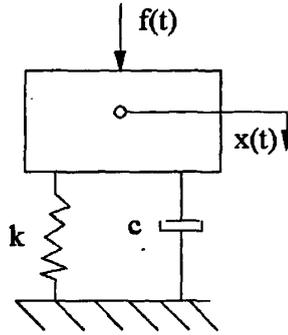


图 4-3 工作台模型

Fig.4-3 Worktable model

式中:

C ——粘性阻尼系数, 取 $1000 N \cdot s / m$

K ——弹性系数, 取 $2MN / m$

4.1.2 交流伺服电机数学模型^[55]

交流伺服电机在控制系统中一般工作在零转速附近, 所以, 交流伺服电机机械特性线性化方程可表示为:

$$M_m = -C_\Omega w_m + M_S \quad (4-4)$$

其中: M_m : 电机输出转矩

w_m : 电动机角速度

$$C_\Omega = dM_m / dw_m : \text{阻尼系数} \quad (4-5)$$

M_S : 堵转转矩

暂不考虑负载转矩, 则电动机输出转矩 M_m 用来驱动负载并克服粘性摩擦, 故转矩平衡方程为:

$$M_m = J_m \frac{d^2 \theta_m}{dt^2} + f_m \frac{d\theta_m}{dt} \quad (4-6)$$

式中：

θ_m ——电动机转子角位移

J_m ——电动机总转动惯量

f_m ——电机总粘性摩擦系数

由上述两式经拉式变换可得电机的传递函数：

$$G(s) = \frac{C_m}{s(J_m s + f_m + C_\Omega)} = \frac{K_m}{s(T_m s + 1)} \quad (4-7)$$

式中：

$$K_m = C_m / (f_m + C_\Omega) : \text{电机增益} \quad (4-8)$$

$$T_m = J_m / (f_m + C_\Omega) : \text{电动机时间常数} \quad (4-9)$$

据电机型号可得，传递函数为 $K_m = 0.1875 \text{N}\cdot\text{m}/\text{A}$ ，机电时间常数为 $T_m = 0.15 \text{ms}$ 。

4.2 PID 控制器

在工程实际中，应用最为广泛的调节器控制规律为比例、积分、微分控制，简称 PID 控制，又称 PID 调节。PID 控制器问世至今已有近 70 年历史，它具有结构简单、稳定性好、工作可靠、调整方便、适应性强等特点，即使在很宽的操作条件范围内都能保持较好的鲁棒性和系统稳定性；当被控对象的结构和参数不能完全掌握，或得不到精确的数学模型时，控制理论的其它技术难以采用时，系统控制器的结构和参数必须依靠经验和现场调试来确定，这时应用 PID 控制技术最为方便。即当我们不完全了解一个系统和被控对象，或不能通过有效的测量手段来获得系统参数时，最适合用 PID 控制技术。PID 控制技术在实际控制中不仅有 PID 控制，还包括 PI 和 PD 控制。PID 控制器就是根据系统的误差，利用比例、积分、微分计算出控制量进行控制的。目前，PID 控制广泛应用于机械、电力、化工等生产行业、也应用于机器人控制、航空航天等尖端领域，大量的实践证明，它非常适合工程应用。

4.3 PID 控制原理

图 4-4 为它的控制系统原理框图，典型 PID 为滞后—超前校正装置。

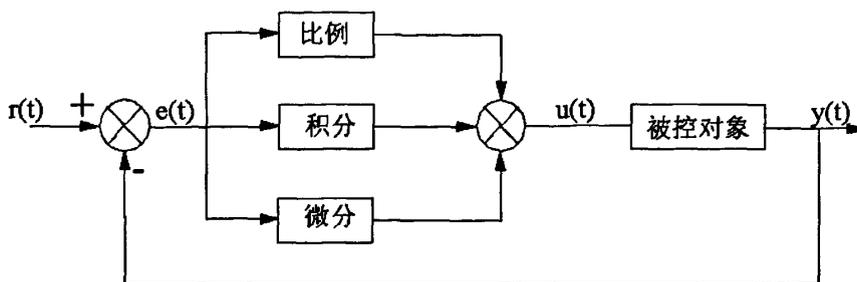


图 4-4 PID 控制系统原理图

Fig.4-4 Principle of PID control system

由图可见，PID 控制器是通过对误差信号 $e(t)$ 进行比例、积分和微分运算，其结果的加权，得到控制器的输出 $u(t)$ ，该值则为控制对象的控制值。PID 控制器的数学描述为：

$$u(t) = K_p \left[e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt} \right] \quad (4-10)$$

式中 $u(t)$ 为控制输入， $e(t) = r(t) - y(t)$ 为误差信号， $r(t)$ 为输入量， $y(t)$ 为输出量。

(1) 比例调节

其输出其输出与输入误差信号成比例关系，系统一出现偏差，控制器立即将偏差放大 K_p 倍输出。比例控制是一种最简单的控制方式。在 PID 控制器中， K_p 值的选取决定了系统的响应速度。增大 K_p 能提高响应速度，减小稳态误差；但是， K_p 值过大会产生较大的超调，甚至使系统不稳定；减小 K_p 可以减小超调，提高稳定性，但 K_p 过小会减慢响应速度，延长调节时间。当仅有比例控制时系统输出存在稳态误差 (Steady-state error)。

(2) 积分调节

积分调节作用的输出与输入偏差的积分成正比。积分作用的输出不仅取决于偏差信号的大小，还取决于偏差存在的时间。只要有偏差存在，尽管偏差可能很小，但它存在的时间越长，输出信号就越大，只有消除偏差，输出才停止变化。

为了消除稳态误差，在控制器中必须引入“积分项”。由于某些原因(如饱和和非线性)，积分过程有可能在调节过程的初期产生积饱和，从而引起调节过程的较大超调。因此，调节过程的初期，为防止积分饱和，其积分作用应当弱一些，甚至可以取零；而在调节中期，为了避免影响稳定性，其积分作用应该比较适中；最后

在过程的后期,则应增强积分作用,使稳态误差进一步减小,直到等于零。

(3) 微分调节

微分调节的输出是与被调量的变化率成正比。在比例微分调节作用下,有时尽管偏差很小,但其变化速度很快,则微分调节器就有一个较大的输出。

自动控制系统可能由于存在有大惯性组件或有滞后(delay)组件,具有抑制误差的作用,其变化总是落后于误差的变化。解决的办法是加入微分环节,它能预测误差变化的趋势。 K_d 值过大,调节过程制动就会超前,致使调节时间过长; K_d 值过小,调节过程制动就会落后,从而导致超调增加。所以在启动过程早期,应该加大微分系统,晚期临近稳态时,减少微分环节作用,使响应更快。

4.4 PID 参数整定与控制系统仿真

4.4.1 SIMULINK 简介

目前应用于工程领域的仿真软件很多,而在控制领域,又以 Mathworks 公司推出的 MATLAB 软件应用最广。本文所应用到的 SIMULINK 实质上是 MATLAB 软件的扩展,它是实现动态系统建模和仿真的一个软件包。它与用户的交互接口是基于 windows 的模型化图形输入的,并且可以方便的选择数值算法、仿真步长等参数,可以通过示波器显示动态仿真结果。本文运用 MATLAB/SIMULINK 对交流伺服控制系统进行 PID 参数整定。

4.4.2 PID 参数整定与系统仿真

PID 控制器的参数整定是控制系统设计的核心内容。它是根据被控过程的特性确定 PID 控制器的比例系数、积分时间和微分时间的大小。因此,如果确定好比例系数 K_p 、积分时间 K_i 和微分时间 K_d 的大小就可以使控制系统达到控制所需要的动态性能,并能进一步优化控制系统。在阶跃响应下的 PID 整定下的 SIMULINK 的仿真模型如图 4-5 所示。

(1) 把积分和微分调节与控制系统断开,只加入比例调节 P ,不断的调整 k_p 值,当 k_p 值较小时,系统的时间响应较慢,需要调整其响应时间。通过逐渐增大 k_p 值可以使系统的响应速度增快,响应时间为 $t=2s$,但此时超调量接近 $\sigma\%=38\%$,超调量显然较大。仿真曲线如图 4-6 所示。

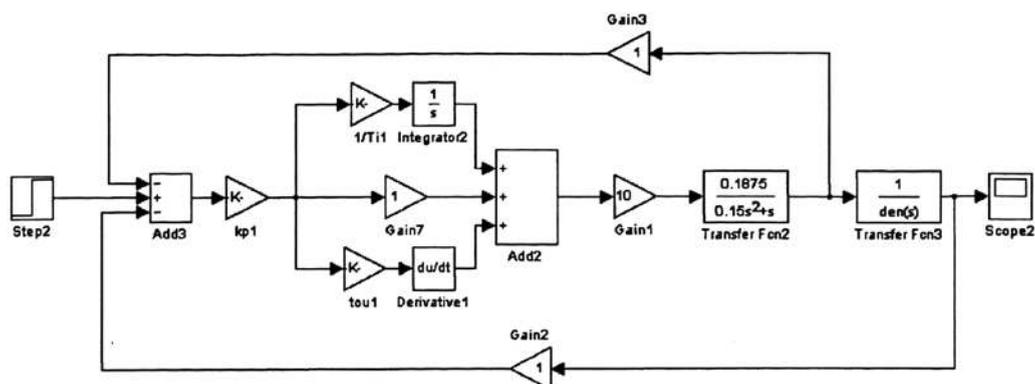


图 4-5 PID 整定下的 SIMULINK 的仿真模型

Fig.4-5 SIMULINK simulation model of PID regulated

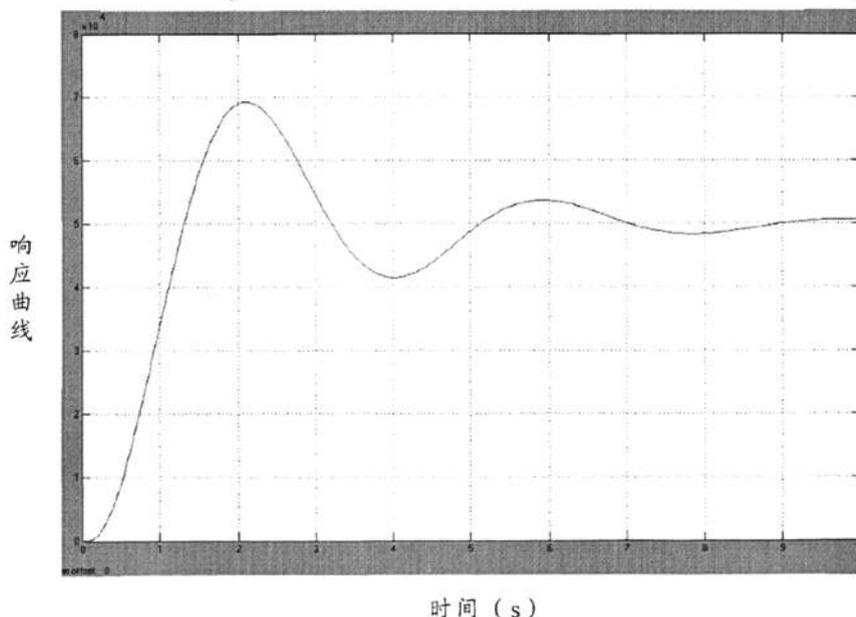


图 4-6 P 整定时的仿真曲线

Fig.4-6 simulation curve of P regulated

(2) 加入 PI 整定的情况下，通过调整 k_p 、 k_i 得到图 4-7 所示曲线，对比只加入 P 整定的情况可知，P 控制和 PI 控制两者的响应速度基本相同，但是由于两种控制的比例系数不同，因此，系统稳定的输出值不同。PI 控制的超调量要比 P 控制略小，显然系统仍然不符合要求，还要继续调整。

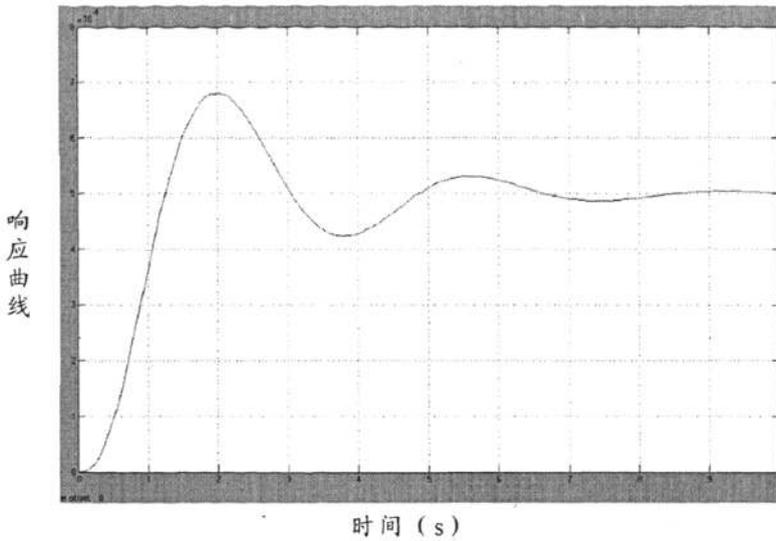


图 4-7 PI 整定时的仿真曲线

Fig. 4-7 simulation curve of PI regulated

(3) PID 整定的情况下, 当 $k_p=400, k_i=1/0.383, k_d=0.2453$ 时, PID 控制的超调量要比 P 控制和 PI 控制小, 而且响应速度加快。超调量为 $\sigma\% = 4\%$, 基本满足控制要求, 仿真曲线如图 4-8 所示。

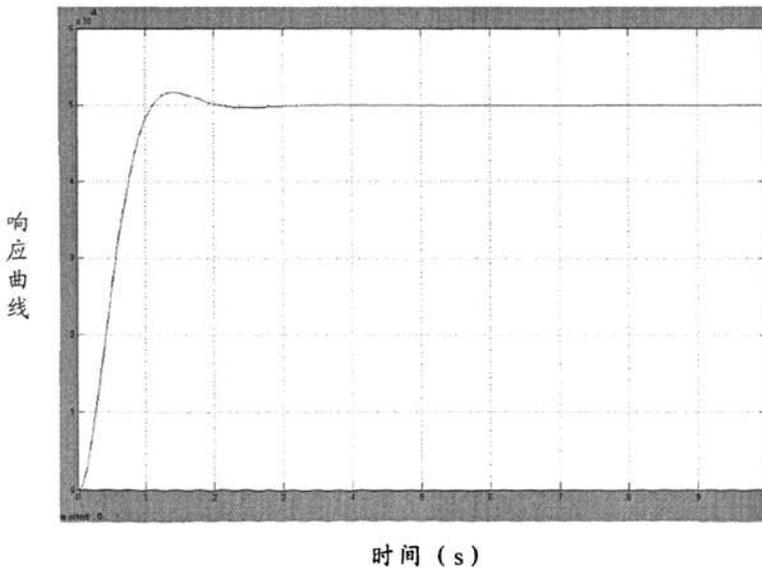


图 4-8 PID 整定时的仿真曲线

Fig. 4-8 simulation curve of PID

(4) 稳态误差分析

对于一个控制系统来说，除了关注系统动态性能指标如超调量，调节时间等性能指标之外，系统误差相应的稳态误差也是关注的重要对象，稳态误差也即控制系统稳定以后的误差。

据此，首先建立 PID 加入到控制系统调节时，能够满足控制系统要求状态的稳态误差模型，也即当 $k_p=400, k_i=1/0.383, k_d=0.2453$ 时的控制系统稳态误差 SMULINK 模型。然后再建立没有加入 PID 校正的闭环控制系统模型，分别分析这两种控制系统各自的稳态误差，然后进行比较分析。PID 已整定好的控制系统稳态误差 SMULINK 模型如图 4-9 所示。

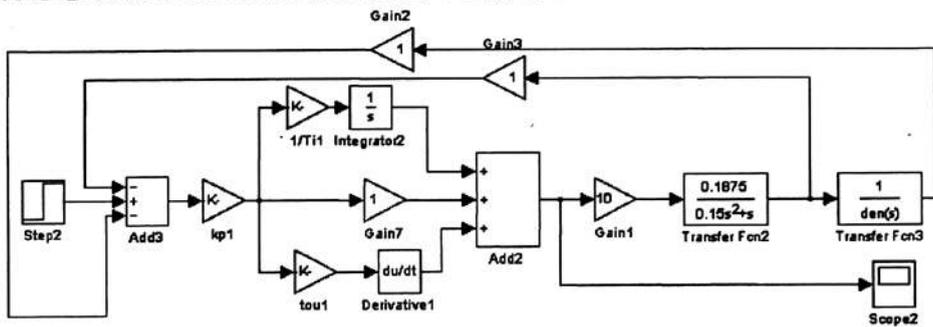


图 4-9 加入 PID 整定下的控制系统稳态误差 SIMULINK 分析模型

Fig. 4-9 SIMULINK model of control system with PID regulated

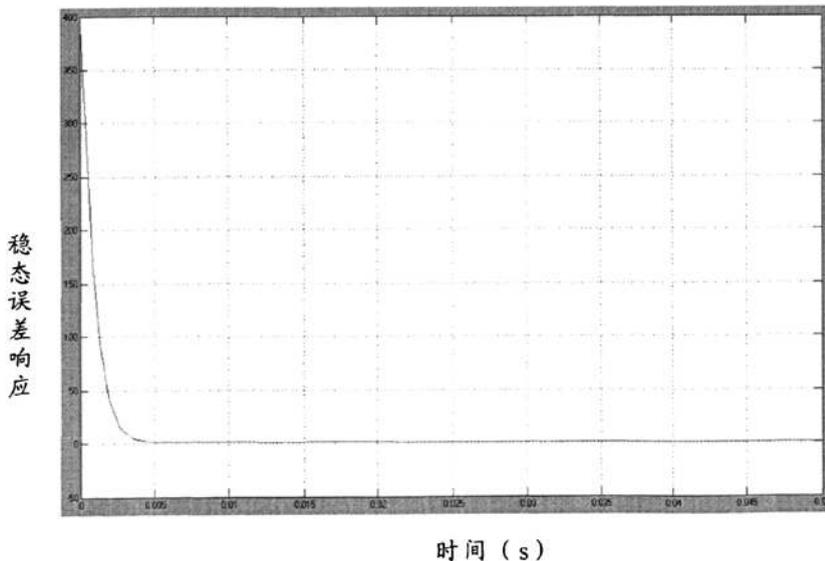


图 4-10 加入 PID 整定下的控制系统稳态误差仿真曲线

Fig. 4-10 Steady-error simulation curve of control system with PID

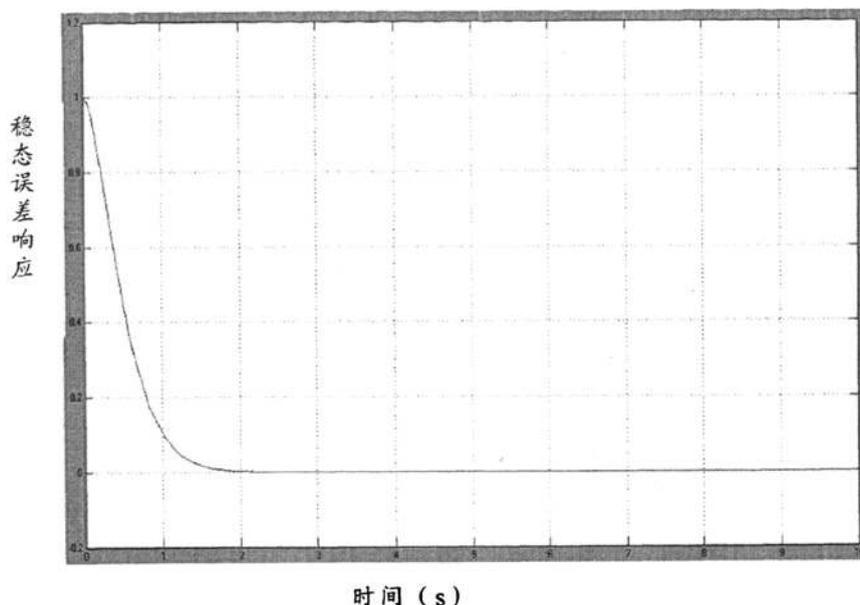


图 4-11 未加入 PID 整定下的控制系统稳态误差仿真曲线

Fig. 4-11 Steady-error simulation curve of control system without PID regulated

图 4-10, 4-11 分别为加入 PID 整定和未加入 PID 整定下的控制系统稳态误差。从图中可知, 两种情况下的控制系统最终稳态误差都为零, 说明控制系统稳定性能较好。加入 PID 整定下的控制系统的恢复时间 (系统扰动后恢复到允许的误差范围内的时间) 远远比未加入 PID 整定的控制系统小, 说明前者的抗干扰能力较强, 也进一步说明了系统加入 PID 整定的必要性。

4.5 本章小结

本章首先根据控制原理建立了交流伺服系统的整个数学模型, 然后对系统中的重要环节, 如交流伺服电机, 工作台等分别建立了数学模型, 分析了 PID 控制原理, 即比例、积分、微分控制, 运用 Matlab/SIMULINK 软件对控制系统分别进行了比例调节、比例积分调节以及 PID 整定, 对运算得到的动态响应曲线作了分析比较。最后, 还分析得出了加入 PID 整定以及未加入 PID 整定下控制系统的稳态误差, 分析稳态误差曲线得出, 控制系统加入 PID 整定可以大大增强系统的稳定抗干扰能力。

5 陶瓷零件快速成型机数控系统 PID 调试

5.1 PMAC 卡的 PID 伺服滤波器

PMAC 卡具有 PID+速度/加速度前馈+NOTCH 滤波的控制环算法功能, 适合用于大多数情况, 用户可以根据自己系统的要求来调整其中的相关参数。除此之外, PMAC 也为用户的特殊要求提供扩展的伺服控制算法, 并且支持用户自己编写的伺服算法。图 5-1 是 PMAC 卡 PID 的伺服环调定原理。

在 PMAC 卡 PID 的伺服环的控制环路中包括了带有积分分离的 PID 反馈滤波器、速度和加速度前馈滤波器。采用前馈与反馈结合的复合控制结构, 既保留了反馈控制对偏差的控制作用, 又能在干扰引起误差前就对它进行补偿, 及时消除干扰的影响。反馈滤波器由误差驱动, 只有在位置指令和位置反馈之间存在偏差式, 反馈滤波才会起作用。前馈滤波只依赖于位置指令, 其不改变系统的稳定性, 只对被调整的量起补偿作用。它的基本思路是将预估式, 反馈滤波才会起作用。前馈滤波只依赖于位置指令, 其基本思路是将预估的可实现控制命令的控制作用直接施加于控制对象, 而不必等到位置误差出现。因此, 前馈控制可以有效地拓展系统带宽。PMAC 卡采用了减小伺服控制系统轨迹误差的两项前馈: 即速度前馈调节和加速度前馈调节。加速度前馈来补偿其误差, 速度前馈能减小微分增益或测速电机环路阻尼所引起的跟踪误差。

伺服环调整系统中各增益和模式的意义如下:

Kp(IX30): 相应通道 PID 参数中的比例增益。该参数为系统的刚性调节系数, 提供系统的刚度, Kp(IX30)值越大, 系统的响应速度越快, 但是如果值太大, 就会产生大的超调量, 系统的稳定性也随之变差。

Kd(IX31): 相应通道 PID 参数中的微分增益。系统的阻尼调节参数, 为系统提供需要的阻尼, 值越大, 系统的稳定性则越高。

Kvff(IX32): 速度前馈增益。相应通道调节参数的速度前馈值, 用于改善跟随特性。其主要作用是减少由于阻尼(与速度成正比)引入的跟踪误差。

Ki(IX33): 相应通道 PID 参数中的积分增益。主要用来消除稳定误差。值越大, 有利于减少系统的超调, 提高稳定性。

Kaff(IX35): 相应通道调节参数的加速度前馈, 用于改善跟随特性, 减少或消除由于系统惯性(与加速度成正比)带来的跟随误差。

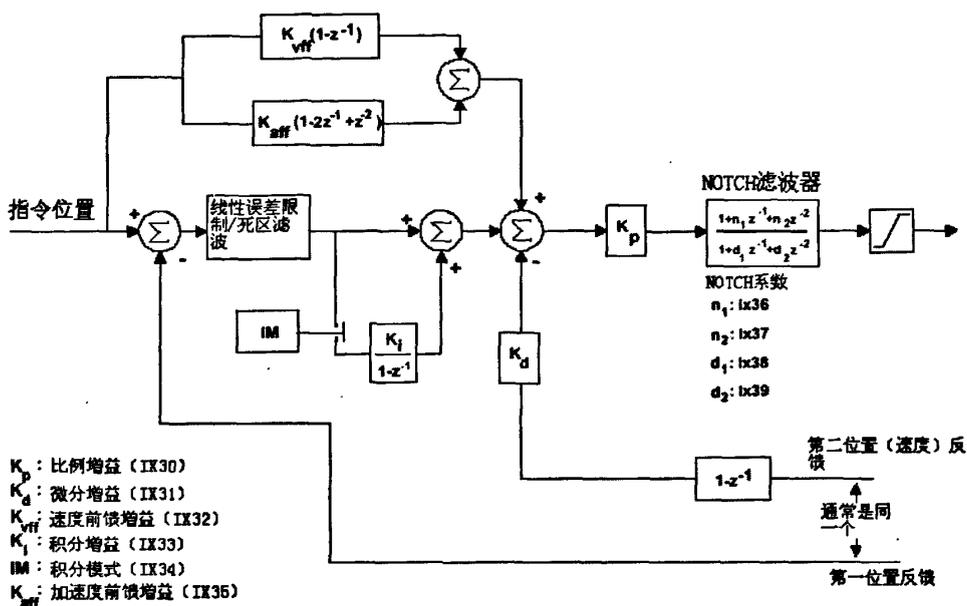


图 5-1 PMAC 卡 PID 伺服滤波器

Fig. 5-1 PID servo filter of PMAC

5.2 PMAC 卡的 PID 控制算法

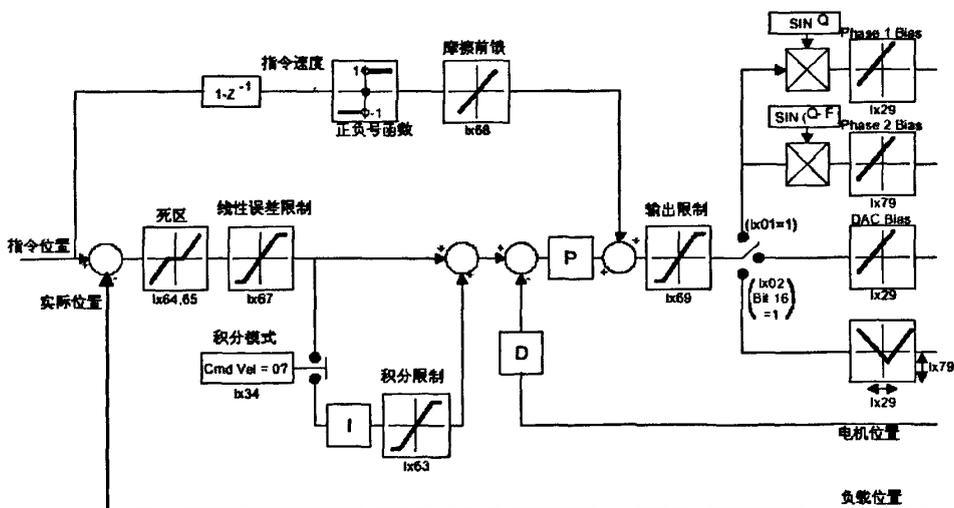


图 5-2 PMAC 的 PID 控制算法原理图

Fig. 5-2 PID control algorithm elements chart of PMAC

PMAC 的 PID 控制算法原理图如图 5-2 所示。IX68 为克服机械摩擦而带来

的误差的摩擦前馈增益。Ix34 用于控制位置误差积分器何时打开，参数为 0 时误差积分器处于执行状态，参数为 1 时，在 PMAC 没有指令控制时运行。IX67 定义了允许进入伺服滤波器的最大的位置误差。IX64、IX65 定义了电机死区增益系数和死区范围。IX29 用来校正 PMAC 的模拟输出与放大器的输出之间的误差。IX69 定义了从控制环送来的最大输出量的大小。IX11 则设定了跟随误差在何等程度下电机将停止运行。

对于电机 X 使用的计算控制输出的 PID 算法实际公式如下所示^[23]：

DACout(n)=

$$2^{-19} * Ix30 * \{ Ix08 * [FE(n) + (Ix32 * CV(n) + Ix35 * CA(n)) / 128 + Ix33 * IE(n) / 2^{23}] \} - Ix31 * Ix09 * AV(n) / 128 \quad (5-1)$$

注释：

(1) DACout(n) 为 16 位的伺服周期输出命令 (-32768 到+32767)。它被转换成-10V 到+10V 的输出。DACout(n) 的值由 Ix69 定义。

(2) Ix08 为电机 X 的一个内部位置放大系数 (通常设为 96)。

(3) Ix09 为电机 X 速度环的一个内部放大系数。

(4) FE(n) 为伺服周期 n 内所得的跟随误差，即为该周期内命令位置与实际位置的差值 [CP(n)-AP(n)]。

(5) AV(n) 为伺服周期 n 内的实际速度，即为每个伺服周期最后两个实际位置的差值 [AP(n)-AP(n-1)]。

(6) CV(n) 为伺服周期 n 内的指令速度，即为每个伺服周期最后两个指令位置的差值 [CP(n)-CP(n-1)]。

(7) CA(n) 为伺服周期 n 内的指令加速度，即为每个伺服周期最后两个指令速度的差值 [CV(n)-VP(n-1)]。

(8) IE(n) 为伺服周期 n 的跟随误差的积分，大小为： $\sum_{j=0}^{n-1} [FE(j)]$ (在所有的伺服周期内积分都起作用。当 CV 不等于 0 时，IX34=1 只关掉了积分器的输入，而没有关掉它的输出。)

PMAC 控制器的 PID+速度/加速度前馈控制环算法所涉及到的参数的含义、作用及调整范围如表 5-1、5-2、5-3 所示^[54]。在进行 PID 调节时可以参考。

表 5-1 PID 参数

Table 5-1 PID parameter

变量	参数	作用	调整值域	数值影响
IX30	P 参数， 比例增益	提供系统所需的刚性 (快速性)	-8388608~8388607 缺省为 2000	数值越大，系统刚性越好，但太大会产生振荡。太小系统会反应迟缓。
	I 参数， 积分增益	用于消除稳态误差 (准确性)	0~8388607 缺省为 1280	与 IX63 时间积分误差有关；如果输出饱满，IX33 无效。
IX34	积分模式	决定积分增益是全程有效还是只在速度为 0 时有效	0 缺省为 1	IX34=0 积分增益全程有效。 IX34=1 积分增益只在速度为 0 时有效。
IX31	D 参数， 微分增益	用于提供足够的阻尼以保证系统稳定 (稳定性)	-8388608~8388607 缺省为 1280	数值越大，阻尼越大，系统越稳定。

表 5-2 前馈参数

Table 5-2 feed forward parameter

变量	参数	作用	调整值域	数值影响
IX32	速度前馈	减小由于微分增益的引入所引起的跟随误差	0~8388607 缺省为 1280	对电流环，IX32 应等于或略大于 IX31。对速度环，IX32 应远大于 IX31。
IX35	加速度前馈	减小由于系统惯性所带来的跟随误差	0~8388607 缺省为 0	反应滞后特别明显时，增加 IX35。
IX68	摩擦增益	减小由于摩擦产生的跟随误差，带负载调整时有效	-32767~32768 缺省为 0	该变量正比于要求速度的符号，速度为正，IX68 被加进输出，速度为负，IX68 从输出中减去。

表 5-3 相关参数

Table 5-3 Correlation parameter

变量	参数	作用	调整值域	数值影响
IX29	模拟量输出偏差	校正 PMAC 的模拟量输出与放大器模拟输入之间的误差	-32768~32767 缺省为 0	数值上应与修正电压计的模拟输出相等。
	模拟量输出极限	用于限制 PMAC 中模拟量输出的大小	0~32767 缺省为 20480	如果控制环送出的模拟量大于该值，则模拟量输出大小将被它限制。

5.3 PMAC 双反馈系统

PMAC 可以构成双反馈控制系统，如图 5-3 所示。在电机和负载端均有检测元件。其中 IX02 存放的是 DAC（模拟量指令）输出值；IX03 存放的是安装在负载上位置反馈元件检测值；IX04 存放的是安装在电机后反馈元件检测值，由卡经过运算转换为速度值。

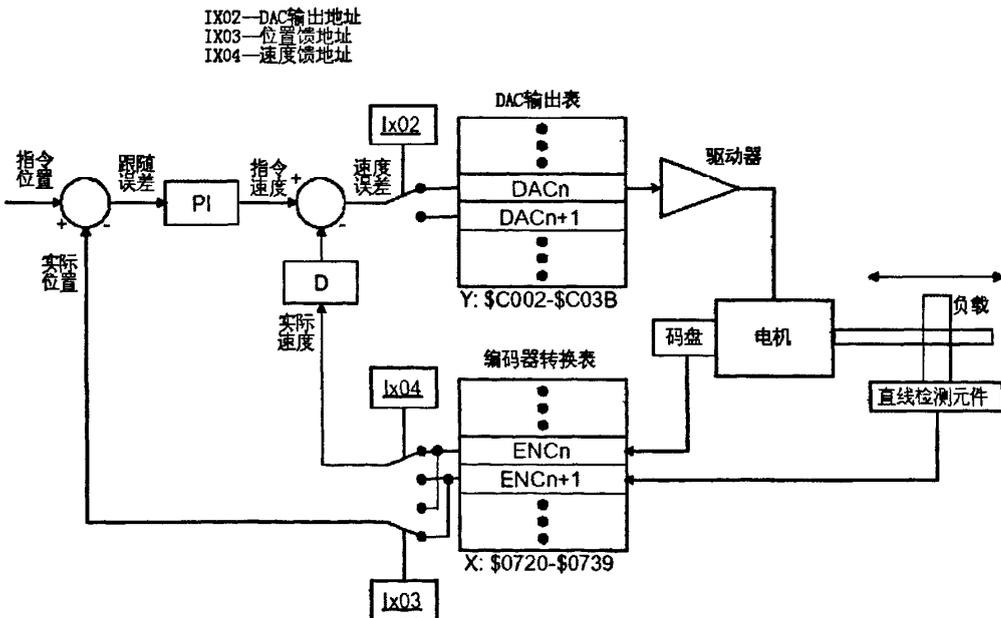


图 5-3 PMAC 双反馈控制系统

Fig. 5-3 Double feedback control system of PMAC

检测元件安装在负载上比检测元件安装在电机上具有更精确的位置测量精度，因其不受电机负载联接种缺陷的影响，然后它具有相对较小的稳定性，因为联轴器的柔量和联结侧隙处在控制环内部了。因为联轴器的缺陷不在闭环中，所以检测元件安装在电机上具有较小的精度，较好的稳定性。

在很多情况下，把检测元件同时安装在电机和负载端可以使系统既精确又稳定。在 PMAC 控制系统中，PMAC 通过编码器转换表将位置及速度反馈给控制卡，然后与指令值比较经过 PID 运算后变为模拟量指令存放到 DAC 输出表中，由该值来控制电机的运动。在 PMAC 卡中每一路闭环通道都有默认值，但也可以根据自己的需要改动这些值构成闭环。

以第一通道为例讲述一个闭环系统的构成。第一步令参数 I100=1，这样激活该电机。第二步是设置 I102、103、104 号参数，这些可以按照缺省值设置，但在双闭环系统（有位置环）中，I103（位置环地址）的值应该和 I104（速度环地址）的值不同，应该设置为相应的编码器通道的值。第三步设置 I910 号参数的值，用来选择反馈元件的译码方式和方向。译码方向一定要注意，否则电机可能会闭不上环，如果选错了方向可以改成另外一个方向即可。

5.4 PMAC 的 PID 参数校正

目前对 PID 整定的方法很多，使用最多的是 PID 反馈控制+前馈控制，PID 校正用于反馈通道上，而前馈控制用于前向通道。

由第四章所述内容可知，比例系数 K_p ，积分系数 T_i ，微分系数 K_d 对控制系统动态特性和稳态特性的影响是不同的。加大比例系数 K_p ，会加快系统的响应速度，但是比例系数如果过大，就会导致振荡次数增多，调节时间加长，系统就会趋于不稳定。但是 K_p 加大会减少系统的稳态误差。积分系数 T_i 太小时，系统将不稳定，而且振荡次数增多，积分能够消除系统的稳态误差，提高控制系统的控制精度，但是 T_i 太大时，积分作用会减弱，以致于不能减少稳态误差。微分控制可以改善动态特性，减少超调量，缩短调节时间，减少稳态误差。

因此怎样调节这些参数才能使控制系统达到稳定、快速、准确地要求是一个需要解决的问题。我们可以利用 PMAC 卡本身附带的软件 PEWIN 来调节各个参数：比例增益 IX30、微分增益 IX31、积分增益 IX33、速度前馈增益 IX32 和加速度前馈增益 IX35。调节过程遵循先比例，再积分，最后加微分的原则。PID 调整界面如图 5-4 所示。

图 5-5 为几种典型的脉冲响应曲线，一条为指令脉冲曲线（也即理论曲线），

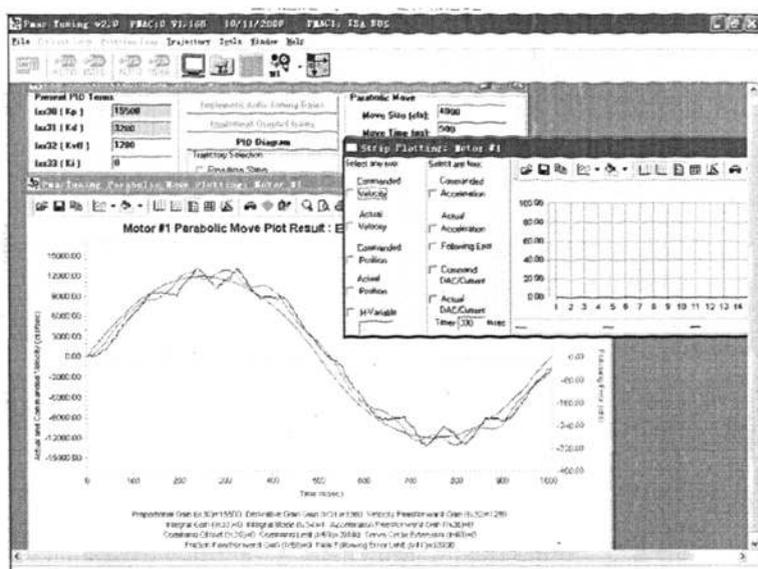


图 5-4 PID 调整界面

Fig. 5-4 Interface of PID debugging

另一条为位置响应曲线（也即实际曲线）。图 5-5 为系统响应迟缓的情况。从图中可以看出系统响应速度较慢，其原因是系统阻尼过大或者刚性太小，因此，可增大比例增益 IX30 或者减少微分增益 IX31 的值来改善。图 5-6 为系统响应存在位置偏差的情况，其原因是由于摩擦造成的，可以通过增大积分增益 IX33 或者加大比例增益 IX30 来减少位置偏差。图 5-7 为系统存在超调和振动的情况，原因是系统阻尼太小或者刚性太大，可通过减少比例增益 IX30 或增大微分增益 IX31 来调节。图 5-8 为理想状态，响应曲线紧跟指令脉冲曲线。

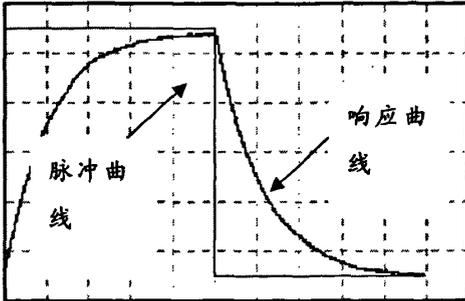


图 5-5 响应延迟情况
Fig.5-5 Sluggish reponse of system

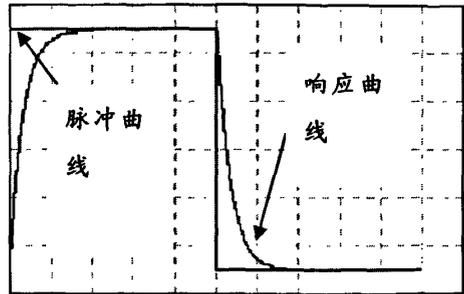


图 5-6 系统存在位置误差
Fig. 5-6 Position offset of system

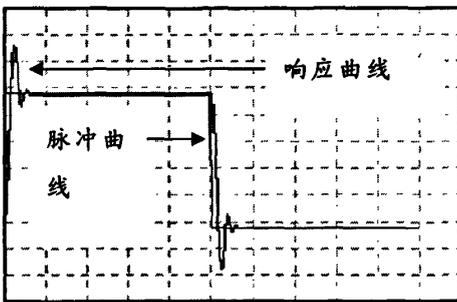


图 5-7 系统存在超调和振动
Fig. 5-7 Overshoot and oscillation of system

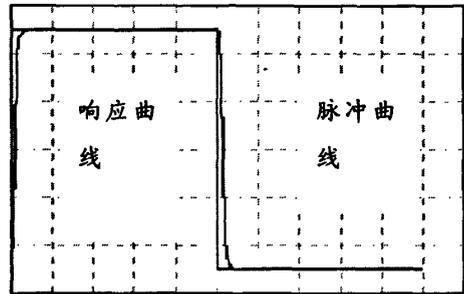


图 5-8 理想状态
Fig. 5-8 Idea case

5.5 本章小结

本章介绍了 PMAC 卡的滤波器以及 PMAC 卡的 PID+速度/加速度前馈+NOTCH 滤波的控制环算法以及 PMAC 卡的 PID 算法，对 PMAC 双反馈系统进行了分析，最后进行了 PMAC 卡的 PID 参数校正调试。

6 陶瓷零件快速成型机数控系统软件设计

6.1 数控系统软件设计功能要求

一般来说，数控系统应具有如下几个基本功能^[51]：

(1) 基本管理能力

数控系统是一种复杂的实时多任务控制系统，它涉及到多种任务和功能需要控制，因此，必须对它们进行合理的调度管理，使之协调工作是数控系统的必备功能。

(2) 人机交互功能

数控系统有大量的信息需要实时显示出来，供操作人员参考。同时，操作者也有大量的信息和命令要提供给控制系统，因而方便灵活的人机交互功能是衡量数控系统性能的重要指标。

(3) 加工程序的预处理功能

数控加工程序是以特定的标准代码来表示其加工信息和加工数据的，因此数控系统要对其进行解释和编译处理，提取辅助功能控制信息供辅助功能控制使用，提取数据信息和运动控制信息进行处理后供轨迹控制使用。

(4) 轨迹控制功能

轨迹控制功能是数控系统的最重要的功能。根据预处理得到的加工信息和数据进行刀具补偿和插补计算，得出每个插补周期的每个坐标的进给量，进而控制伺服电机的运动，加工出所需的工件。

(5) 伺服控制功能

伺服控制功能是控制器和机械的桥梁，数控系统通过它来控制电机进行运动而完成相应的轨迹控制。

6.2 数控系统软件结构

在数控系统实现上，首先用三维造型软件生成需要制造的陶瓷零件的三维实体模型，然后用分层软件对三维软件进行分层切片处理，得到每一层的形状和厚度，并按 PMAC 代码集生成符合快速成型工艺特色的 CNC 数据信息，由 ISA 总线把已经转换的 NC 代码传递给运动控制卡，运动控制卡发出模拟电压速度控制信号给雕刻控制执行机构控制刻刀在料斗铺设已凝固好的每一层石蜡上刻出该层形状。然后，运动控制卡控制步进电机的正反转，从而控制铺料系统执行机构在镂空处填充成型材料，并对成型情况进行监控和运动参数的反

馈，必要时对快速成型设备的运动状态进行干涉，重复累加之后烧结坯件，最终形成陶瓷制件。

本系统软件由上位机软件和下位机软件组成，采用模块化设计结构。因为Windows具有操作界面友好，开发程序可移植性好的特点，在Windows环境中采用VB开发下位机软件，上位机软件主要起到管理系统的作用，负责人机交互，用户信息管理、数据处理、通讯控制、图形显示、动态仿真、系统状态检测等，图6-1为上位机软件结构原理图。

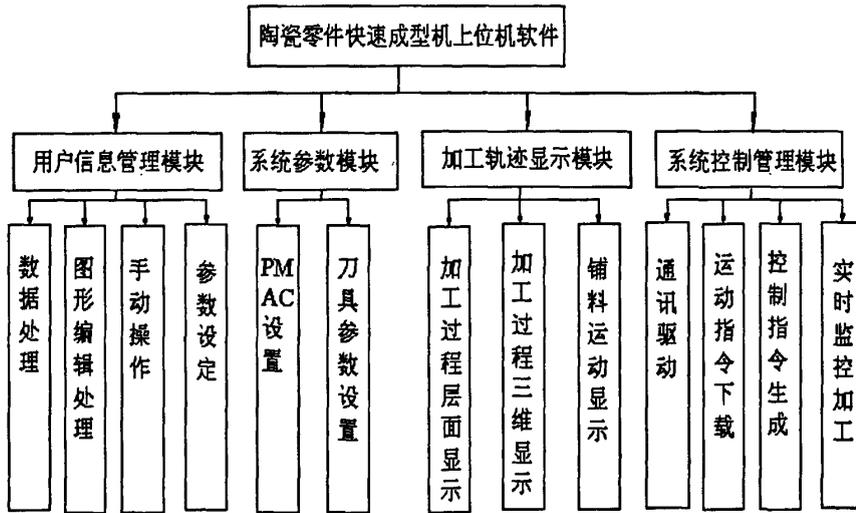


图 6-1 控制系统上位机软件结构

Fig. 6-1 Principal software structure of control system

(1) 用户信息管理模块 该模块主要用来实现片层数据处理以及图形编辑处理功能，设定铺料平台升降速度、料斗运行速度等参数。

(2) 系统参数模块 用来完成PMAC的设置，使其运动控制模块实现各轴的运动控制，进而完成石蜡层的雕刻、料斗铺料、工作台升降等动作，刀具参数设置子模块用来根据工艺要求完成刀具参数的设定。

(3) 系统控制管理模块 该控制管理模块包括运动指令的下载、控制指令的生成等。其主要功能是下载运动指令并转换成 PMAC 运动程序，获取执行机构的运动状态在上位机中进行显示并根据不同的成型工艺设置不同参数，实现实时监控加工。

(4) 加工轨迹动态显示模块 该模块主要用于加工过程中的CAD三维模型加工显示，加工过程中层面显示和铺料运动显示。该模块可以实时地显示加

工进度和加工轨迹。

下位机软件是基于PMAC，采用PMAC支持的类BASIC语言开发的，主要包括、命令执行模块、数据采集模块、运动插补模块、PLC监控模块、运动程序解释模块等。其主要实现的功能是①从通讯口接受命令控制成型机铺料机构的铺料动作和雕刻动作的执行；②数据采集功能，采集成型机的状态参数并发送给上位机。③实现运动插补功能。④实现伺服驱动和主轴驱动功能。⑤实现PLC对系统的监控。本文将对重点的模块加以分析论述。

6.3 PMAC 卡的通讯

在该控制软件体系中主要利用双CPU通讯，一方面把CAD模型的层片CNC加工信息下载到DPRAM二进制循环程序缓冲区中，将格雷码ASCII转换成二进制形式，然后把信息送到PMAC循环运动程序缓冲区，新下载的程序会覆盖已经被执行的程序行，程序执行和程序行的下载可以并行进行。另一方面又获取执行机构的运动状态信息在上位机中进行显示。根据不同的成型工艺，设置不同参数，实现实时监控加工。所以，通过这种方式，可以实现动态实时上下下载程序。PMAC提供了具有很强开放性的Pcomm32函数库和ActiveX通信控件PtalkDT。所以，要实现与PMAC的通信只需调用Pcomm32函数库里相应的函数或者使用PtalkDT通信控件，即可实现与PMAC的通讯。首先，应加载Pcomm32，建立与PMAC的连接，其部分程序如下所示。PtalkDT主要函数如表6-1所示。

表6-1 PtalkDT函数

Table 6-1 PtalkDT function

函数名	注释
DownloadFile (filename)	将file文件下载到PMAC中
DPRGetDWord(offset)	从DPRAM中的offset地址中取出一个32位整数
DPRGetDWord(offset,value)	将DPRAM中的offset地址赋给一个32位整数
Flush()	清空PMAC输出缓冲区和I/O口数据
GetControlResponse(response,Char)	向PMAC发送一个控制字符
GetControlResponse(response,Command)	向PMAC发送一个命令
SaveSettings ()	保存PMAC设置
ShowPropertyPage()	显示PMAC的属性，并可以修改其属性

加载Pcomm32:

```

//申明动态链接库dll
Declare Function OpenPmacDevice Lib "pmac.dll" (ByVal pmac As Long) As Long
Declare Function ClosePmacDevice Lib "pmac.dll" (ByVal pmac As Long) As
Long
Declare Function PmacGetResponseA Lib "pmac.dll" (ByVal pmac As Long,
ByVal response$, ByVal dummy As Integer, ByVal com_string$) As Long
//连接PMAC
m_bDriverOpen = 0
'connect device
'The PMAC device number is 0 for the first PMAC in your system, 1 for
the second and so on.
m_dwDevice = 0
m_bDriverOpen = OpenPmacDevice (m_dwDevice)
.....
//Y轴正转
Dim response As String * 2
Call PmacGetResponseA(0, response, 2, "#2j+")
//断开链接
Call ClosePmacDevice(0)
上下载程序如下：
.....
//下载运动程序
Private Sub DownloadButton_Click ( )
    PtalkDT1.SaveSettings
    PtalkDT1.DownloadFile (FileSelect)
End Sub
.....
//上载运动程序
Private Sub UploadButton_Click ( )
    If PLCFrame.Enable=True then
        PtalkDT1.UploadData="list plc"+PLCText.Text //上载PLC程序
    Else If PROGFrame.Enable=True then
        PtalkDT1.UploadData="listprog"+PROGText.Text //上载运动程序
    End If

```

End Sub

.....

6.3 PMAC 的参数变量

PMAC 卡包含有一种控制参数 I 参数、三种用户变量 M、P、Q。各参数和变量的含义如下：

I 参数：分两类，系统级别和通道级别（所谓通道即卡中的每个电机控制通道）

系统级别是用来设置卡的工作运行方式，100 号以内，如参数 15 用来控制 PMAC 中的 PLC 程序是否运行，以什么方式运行。其它参数可以控制诸如卡的报错方式、伺服中断周期、串行通讯方式、缓冲区的开关及工作方式等。

通道级别是针对每一个电机的不同要求而需要设置的参数。卡上的每一个通道代表所要控制的每一路电机，必须针对电机的不同情况进行设置。例如 IX00—通道是否激活（1 表示该通道激活，可以工作，0 表示该通道关闭，处于禁止工作状态。缺省时 I100=1，其余为 0，即第一通道激活）（其中 X 代表第 X 号电机）。

M 变量是由实验者自己定义一个值，指向某一寄存器或内存，实验者再通过该 M 变量访问它所指向的寄存器或内存。推荐按照指定的 M 变量访问指定的寄存器，例如：M166->X:\$0033, 0, 24, S（X 轴实际速度，单位为该数值 /3072 cts/伺服周期）

表示 M166 指向存储器 X 列的 0033H 号地址，该地址存放的是 1 号电机的实际速度值，其中 0 和 24 表示从该地址的 0 位到 24 位用来存放实际速度值，S 表示是一个有符号数。这样就可以在程序中利用 M166 这个变量来访问该寄存器。

P、Q 变量这两种变量可以由实验者随意定义使用，但不能在程序中重复定义。

6.4 PMAC 的运动插补模块

PMAC 具有的轨迹插补模式有：线性插补模式、圆弧插补模式、SPLINE 插补模式和 PVT 插补模式。

（1）线性插补模式-LINEAR

对于 PMAC 用户来说，直线插补是最通用的方式。直线插补轨迹包括加速时间和运动时间。直线插补用到的几个参数分别为移动速度(F)、移动时间

(TM)、加速时间(TA)和 S 加速时间(TS)。线性插补运动是指运动轴按照指定的移动速度(F)或者移动时间(TM)运动到指定位置。在此运动期间内,可以实现运动的加减速过程。如果单轴运动的加速度是常数,则时间-速度曲线是梯形曲线,要想使时间-速度曲线是 S 形轨迹,可以通过设置加速时间(TA)和 S 加速时间(TS)来实现,一般可设加速时间(TA)为零。图 6-2 为有 S 加速的直线插补的时间-速度曲线图。

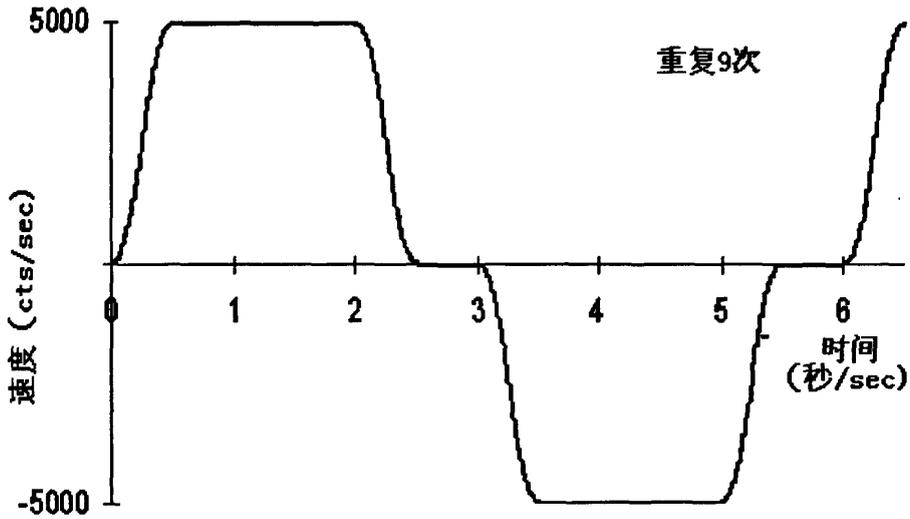


图 6-2 直线插补的时间-速度关系图

Fig. 6-2 Relationship of Time-speed of linear interpolation

图 6-2 的插补代码如下所示:

```

***** 设置和定义 *****
DEL GAT                ; 清除任何被定义的集合缓存区
&1                    ; 坐标系 1
CLOSE                 ; 确保所有缓冲关闭
#1->1000X              ; 电机 1 定义为 X 轴

***** 运动程序文本 *****
OPEN PROG 2           ; 打开缓存, 为#1 电机编程输入程序
CLEAR                 ; 覆盖掉缓存中的文本
LINEAR                ; 线性插补模式
INC                   ; 增量模式 (运动由距离指定)
    
```

TA500 : 设置 1/2 秒 (500 毫秒) 加速时间
 TS250 : 每半个 S 曲线的加速时间为 1/4 秒
 TM2000 : 2 秒运动时间 (到减速的起点)
 P1=0 : 初始化循环计数器变量
 WHILE (P1<10) : 直到条件为假
 X10 : 使 X 轴正向移动 10 cm (10,000 cts)
 DWELL500 : 在此位置停留 1/2 秒
 X-10 : X 轴负方向移动 10 cm
 DWELL500 : 在此位置停留 1/2 秒
 P1=P1+1 : 增量式循环计数
 ENDWHILE : 结束循环
 CLOSE : 关闭缓存, 结束程序

运行程序:

&1 B2 R; 坐标系 1, 指向运动程序 2, 运行

(2) 圆弧插补模式-CIRCLE

在圆弧插补模式下定义移动速度(F)、移动时间(TM)、加速时间(TA)和 S 加速时间(TS)等参数与在线性插补模式下相同, 不同的是在圆弧插补之前必须定义圆弧插补平面, 一般圆弧插补用在两维的平面轨迹插补中。其主要的定义如下:

①运动分段时间。主要是用来设置每次移动的最小时间单元。典型的命令为令 I13 = 10。

②插补平面定义。典型的插补平面有: X-Y 平面 (NORMAL K-1)、Z-X 平面 (NORMAL J-1)、Y-Z 平面 (NORMAL K-1)。

③ 圆心矢量的定义方式主要有绝对坐标模式(ABS), 相对坐标模式(INC)。

④圆弧方向和指令定义。圆弧方向包括顺圆插补 (CIRCLE 1) 和逆圆插补 (CIRCLE 2)。圆弧指令一般用 CIRCLE (1 或 2) X {Data} Y{Data} R{Data} 或者 CIRCLE (1 或 2) X {Data} Y{Data} I{Data}J{Data}表示。

图 6-3 为典型的圆弧直线插补, 圆弧直线插补程序如下所示:

DEL GAT : 清除未定义的集合缓冲区
 &1 : 坐标系 1
 CLOSE : 确保所有缓冲关闭
 #1->2000X : #1 电机定义为 X 轴

```

#2->2000Y          ; #2 电机定义为 Y 轴
I13=10             ; 每次移动的最小时间单元
*****
OPEN PROG4 CLEAR   ; 打开缓存, 准备进入
NORMAL K-1         ; 定义在 XY 平面上插补
    
```

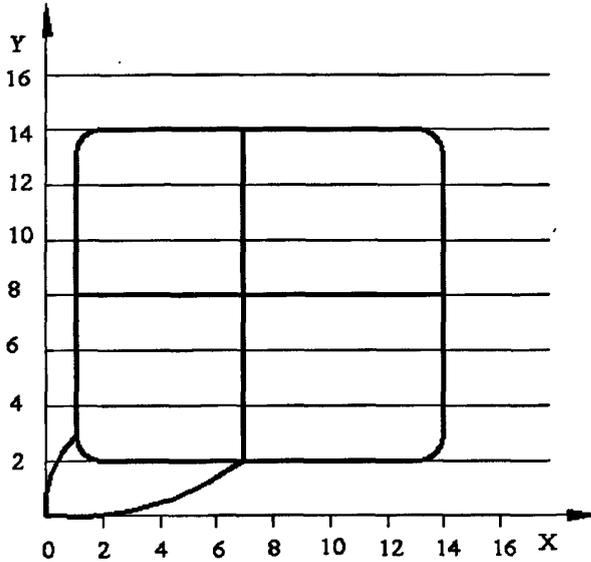


图 6-3 PMAC 中的圆弧直线插补

Fig. 6-3 Circle and linear interpolation of PMAC

```

RAPID X1 Y4 ; 快速运动到 (1, 4)
F150 ; 定义直线和圆弧速度
LINEAR Y13 ; 直线运动
CIRCLE1 X2 Y14 I1 J0 ; 顺圆插补
LINEAR X13; 直线运动
CIRCLE1 X14 Y13 I0 J-1; 顺圆插补
LINEAR Y3 ; 直线运动
CIRCLE1 X13 Y2 I-1 J0 ; 顺圆插补
LINEAR X2 ; 直线运动
CIRCLE1 X1 Y3 I0 J1 ; 顺圆插补
RAPID X1 Y8 ; 快速运动
    
```

F150 ; 定义直线和圆弧速度
 LINEAR X14 ; 直线运动
 Y13; 直线运动
 CIRCLE2 X13 Y14 I-1 J0 ; 顺圆插补
 LINEAR X7; 直线运动
 LINEAR Y2 ; 直线运动
 DWELL 100 ; 停留 100ms
 RAPID X0 Y0 ; 快速运动
 CLOSE ; 关闭缓存, 结束程序

(3) SPLINE 插补模式

该插补模式实质上就是三次样条拟合插补模式。其基本原理是: PMAC 在执行一个运动时, 先把总的运动时间等分, 规定每一段时间长度为 T_A 。然后将运动分配到每个轴上, 对每一根轴给定一个目标位置。最后通过比较当前位置以及在这之前和之后的运动命令, 由上述三点产生样条插补的初始值, 沿时间坐标计算对应点的坐标并进行连续插补, 得到对每根轴产生一个对时间的三次位置曲线。PMAC 既支持均匀拟合插补也支持非均匀拟合插补。每轴可以单独按照自己的插补方式进行插补。

(4) PVT 插补模式

PMAC 提供了 PVT 插补模式, 也即位置-速度-时间插补模式来满足用户对运动轨迹轮廓的直接控制。在运动插补过渡中, 可以直接指定轴的运动状态, 比如, 在每一个区段, 可以指定区划点的位置或者距离, 速度以及运动时间等。因此, 具有更精确的轨迹, 但是需要更多的计算时间。

6.5 PMAC 的 PLC

PLC 程序一般只能用 M、P、I、Q 四种变量, 其它变量均不可用。PLC 程序的一般形式为:

CLOSE	//关闭所有打开的缓冲区
DELETE GATHER	//删除已存在的数据采集缓冲区
DELETE TRCE	//删除已存在的数据采集缓冲区
OPEN PLC n	//打开 PLC 程序 n 缓冲区
CLEAR	//清除缓冲区
.....	//程序控制代码
CLOSE	//关闭缓冲区

ENABLE PLC n //使 n 缓冲区的程序有效

下面介绍一个编码器模数检测的 PLC 程序。该程序 PLC 程序应用了 PMAC 的位置捕捉功能，用第 3 个通道触发捕捉装置，然后检测自最后一次触发的计数值，就可以对编码器 1 进行一圈检测。这个动作只有在通道被捕捉后才能开始。

*****设置和定义*****

```
CLOSE //确保所有缓冲区关闭
P50=2000 //每转时的计数值
I902=1 //在通道 C 上升沿捕捉
M40->* //控制操作标志
M41->* //错误标志
M103->X:$C003,0,24,S //编码器 1 捕捉位置寄存器
M117->X:$C000,17,1 //编码器 1 位置捕捉标志
CLOSE //所有缓冲区关闭
```

*****PLC 程序*****

```
OPEN PLC4 //打开缓冲区
CLEAR //清除存在的内容
IF(M40>0) //通过设置 M40 为 1 来启动
IF(M40>1 AND M117=1) //非第一次，捕捉
P12=P11 //从最后一次存储
P11=M103 //最新捕捉
P13=P11-P12
IF(P13>P50/2) //正转
IF(ABS(P13-P50)>1) //多于 1
M41=1 //设置出错标志
ENDIF
ELSE
IF(P13<-P50/2) //正转
IF(ABS(P13-P50)>1) //多于 1
M41=1 //设置出错标志
ENDIF
ELSE //同一指示第二次读入
IF(ABS(P13)>6) //出错范围允许脉冲宽度
```

```

        M41=1                //设置出错标志
    ENDIF
ENDIF
    ENDIF
ELSE                        //第一次 THRU
    IF(M117=1)              //位置捕捉
        P11=M103*          //GRAB 捕捉位置
        M40=2              //标记第一次完成
    ENDIF
ENDIF
ENDIF
ENDIF
CLOSE
M40=1                      //不会立即开始
M41=0                      //清除出错标志启动
ENABLE PLC4                //使缓冲区程序有效

```

6.6 PMAC 的数据采集

PMAC 卡能够利用其自身的数据缓冲区完成数据的采集。利用 PMAC 卡的数据采集功能能够实时采集任何 PMAC 卡的地址信息，也可以由外部触发采集，然后把采集信息上载到计算机用于处理和分析，其执行程序可产生采集数据的图形和平台。

PMAC 卡的数据采集寄存器地址最多达 24 个地址，每个地址 24 或 48 位宽，(由 I21-I44 定义；I20 作为标志；I20 决定了哪些数据源将被采集)，采样周期从 1 到 8 千万个伺服周期。数据采集周期由 I19 设定。(I19 的单位是伺服周期。)如 I19 设定为 1，采样周期为 2250 Hz 为缺省值，如果希望采样周期为 100 Hz (22.5 次低于)，I19 应设为大约 22 或 23(I19 应设为整数)。这将产生一个实际的采样周期 110 HZ 或 95HZ。

PMAC 卡的数据采集主要用于系统判别，伺服环调整，程序的编译以及设备的编译和维护等方面。

PMAC 可用在线指令采集数据。指令也可通过在线窗口或运动程序中的在线指令或 PLC 程序发送。PMAC 在线指令可以用来定义和控制用来存放采集数据的数据缓冲区。采集用到的主要控制命令如下：

Define Gather ; 创建数据缓冲区，PMAC 准备采集数据

Gather ; PMAC 开始采集数据

&1 B 10 R ; 运行 10 号程序

.....

End Gather ; PMAC 的采集结束

List Gather ; 上传数据到 PC 机

Delete Gather ; 删除缓冲区

在运动程序或 PLC 程序, 采集指令可如下使用:

COMMAND "DEFINE GATHER" CMD"DEF GAT"

COMMAND "GATHER" CMD"GAT"

COMMAND "END GATHER" CMD"ENDG"

6.7 本章小结

本章首先介绍了数控系统软件的设计功能要求, 介绍了数控软件的结构, 对程序的上载和下载, PMAC 的 PLC, 系统的 PMAC 插补模块和数据采集分别作了分析, 给出了具体的插补运动程序和 PMAC 的 PLC 等。

7 层合速凝快速成型技术实验

采用基于石蜡速凝特性的层合速凝快速成型技术制备的陶瓷制件的原料是石蜡和含有陶瓷粉的蜡料,由于石蜡本身的一些特点,会受有很多影响因素,如熔融的蜡浆在冷却时会收缩,石蜡的熔点较低,在浇注熔融的陶瓷浆料的过程中,已镂空的凝固石蜡层形状是否会遭到破坏等等。因此,有必要通过实验来论证基于石蜡速凝特性的层合速凝快速成型技术的可行性。

7.1 实验目的

本实验研究内容主要有:

(1) 研究试样在层叠后烧结后的变形情况。由于石蜡的收缩性,而且层叠制造后的陶瓷坯件在烧结后难免会出现零件的局部翘曲变形,因此有必要研究试样的变形情况,为进一步改进工艺,减少试件的收缩和降低变形打好基础。

(2) 对烧结完成的制件进行机械性能进行测试研究。主要考察陶瓷制件的抗弯强度和抗拉刚度材料力学性能,以及陶瓷制件层间结合力的情况。

(3) 对陶瓷制件的断面进行 SEM 扫描,观察陶瓷制件层间的结合情况,对纵向叠层试样烧结前断面 SEM 照片和烧结后的断面的 SEM 照片来进行观察、比较;为排蜡烧结工艺进一步改进提供依据。

7.2 实验方案

本实验要制备的制件如下图所示。在制备好的石蜡板上刻出一正方形,接着将融熔的蜡浆填入镂空的部分,制得第一层;然后在第一层上铺上同等厚度的石蜡,在其上刻出一“田”字形,再次将蜡浆注入镂空的部分并将其刮平,制得第二层;最后在第三层石蜡板上刻出一“口”字形,并注入蜡浆刮平后,得到三层叠加的陶瓷制件。

本实验首先用蜡浆制备出叠层的试样,进行相应的机械测试实验,验证实验的可行性。

其次比较叠层和未叠层陶瓷试样的力学性能,进一步验证实验的可行性。

7.3 实验设备和原料

实验设备主要有用于测定材料抗

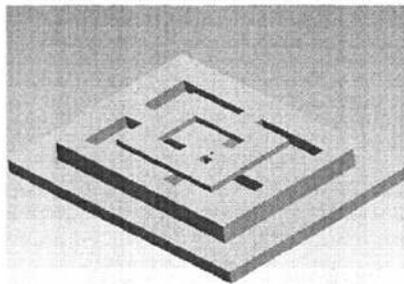


图 7-1 叠层陶瓷试样示意图

Fig. 7-1 Stacking ceramics sample

弯刚度的 PT-1036PC 万能材料试验机，万能试验机，游标卡尺一把，KYKY-1000B 型扫描电镜。所用的原材料由滑石粉、石蜡和油酸配制而成，其中含有滑石 ($Mg_3(Si_4O_{10})(OH)_2$) 84~85%、石蜡 14~15%、油酸等添加剂 0.3~0.7%。用于在排蜡工序中吸附液态石蜡的吸附剂氧化铝粉。

7.4 实验过程

由于在制件叠加过程中受到很多因素的影响，因此，很有必要考察每一步的材料制备情况，该实验的过程基本有以下几部分组成：

(1) 石蜡薄板的制备。打开加热系统，将熔融的石蜡倒入盛料仓，封好仓口，然后在工作台上铺料，刮平铺好的蜡浆，最后蜡浆凝固成石蜡薄板。

(2) 蜡板的雕刻。首先先用三维造型软件生成制件的三维实体模型，而后利用用分层软件对其进行分层处理，得到每层的形状信息，然后把层片信息转换成 PMAC 卡能够识别的数控加工信息，控制雕刻机在制备好的蜡板上刻出所需的图形，雕刻的深度为 1~3mm。

(3) 陶瓷浆料的浇注。将蜡浆料在 90~110℃ 熔融后，并搅拌均匀。将蜡浆倒在雕刻好的蜡层表面，待蜡浆填充好镂空的部分，然后把多余的蜡浆刮走，刮平蜡板平面。

重复上述操作得到三层叠加的陶瓷生坯。

将制作好的三维原型实体进行排蜡素烧，排蜡温度在 100~300℃，素烧后将产品轮廓线外的余料敲击去除，得陶瓷素坯；陶瓷素坯在 1000℃ 以上烧成，得到所需的陶瓷制件。

其基本的实验过程示意图如下：

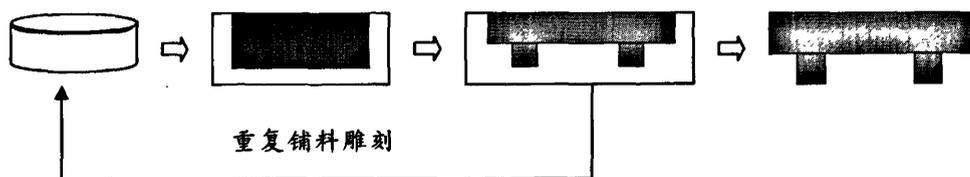


图 7-2 陶瓷制件制备过程示意图

Fig. 7-2 schematic of preparation process for ceramics parts

7.5 实验结果分析

7.5.1 试样变形研究

由于原料中含有石蜡，试样在烧成过程中会产生收缩。另外由于叠层累

加的关系,试样在局部会存在翘曲变形的情况,产生变形的主要原因有:

(1) 排蜡温度过高,由于产品结构的各异导致产品各向收缩不一致而产生变形;

(2) 由于吸附剂的收缩或疏密度的差别而产生变形;

(3) 排蜡过程中升温速率和保温时间没有掌握好,特别是在室温至 300℃ 这个阶段升温速率太快,保温时间太短,导致石蜡来不及挥发而产生变形;

产品外形尺寸达不到技术要求,给陶瓷生产带来很多的困难。如何精确控制烧成制品的外形尺寸,提高产品的综合成品率,仍然是较为复杂的课题,因为它几乎涉及到陶瓷生产的每个环节。通过研究不同形状的试样在烧成前后试样尺寸的变化,得出蜡浆用于快速制造陶瓷制件过程中的变形规律,有助于原型初期的设计,减少制件的误差,从而较为精确地控制产品的外形尺寸。

将叠层试样进行排蜡烧成处理后,测量试样的大小,试样烧成前数据与烧成后的数据进行对比,并计算其线收缩率,表 7-1 为试样线收缩率,图 7-3 为烧成的叠层陶瓷试样。

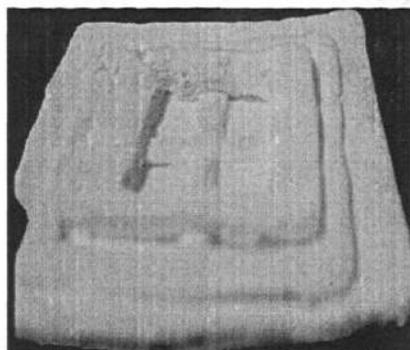


图 7-3 烧成的叠层陶瓷试样

Fig. 7-3 Laminated ceramics sample after sintering

表 7-1 试样线收缩率

Tab. 7-1 The shrink rate of sample

烧成前长度 (mm)	烧成后长度 (mm)	收缩率 (%)
50.26	45.44	9.59
50.40	45.72	9.68
50.20	45.36	9.64
50.20	45.36	9.64

通过观察,发现试样的形状保持不变,未出现翘曲变形的现象,但是试样在烧成后产生了收缩,收缩主要是蜡料的排出和陶瓷粉料的烧结引起的,但是由于陶瓷粉料的体积分数较大,因此收缩并不明显。

7.5.2 制件的性能研究

通过对制件的性能研究能够很好的考察制件层间的结合情况以及工艺方面是否有缺陷,因此,很有必要测试制件的材料力学性能,本研究主要对陶瓷

材料的两个重要力学性能，即制件的抗弯强度和抗拉强度进行测试，测试在 PT-1036PC 万能材料试验机上完成。通过测试得到制件抗弯强度比较曲线。

经过测试，叠层制件和未叠层制件的抗拉强度分别为 22.8 MPa, 23.4 MPa。

对比叠层和未叠层的试样的抗弯强度和抗拉强度，可以发现叠层试样的抗弯强度与未叠层试样相比虽然有所下降，但是相差很小。分析其原因是：叠层试样在制备过程中，由于层与层凝固速度不一而引起局部张力，造成层与层间界面的形成，但是通过长时间的排蜡烧成，层间的张力变小或者消失，且层与层之间的蜡料相互渗透熔合在一起成为一个整体，以致叠层试样内部的层间界面消失，因而叠层与未叠层陶瓷试样在强度方面几乎没有差别。

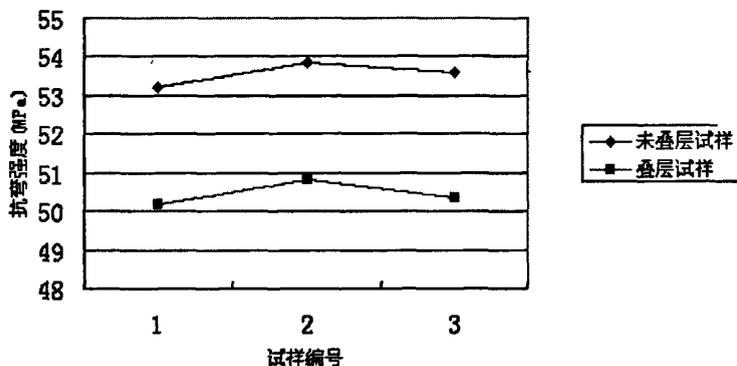


图 7-4 抗弯强度比较图

Fig. 7-4 comparison diagram of bending strength

7.5.3 纵向叠层试样扫描

对比叠层材料烧结前断面 SEM 照片（如图 7-5）和烧结后的断面的 SEM 照片（如图 7-6）来观察试样叠层之间的结合情况，从图 7-5 可看出试样烧结前断面上有一个层间结合缝隙，其原因是：（1）叠层时蜡浆的温度降低太多，不能将底层的蜡浆熔化成为一个整体。（2）试样在制备过程中，叠层时受力不均引起。而其它层之间没有结合缝隙，即叠层时没有出现分层，其不分层的原因是在成型中由于温差存在，温度高的蜡浆将温度低的蜡浆完全熔化，消除了层间界面。而试样经过烧结之后，断面上没有任何层间界面，如图 4-15 所示。从图中可以发现陶瓷粉料已经烧结，但是在制件中存在微气孔等烧成缺陷，分析这些孔隙的产生原因：①在制备试样时蜡浆搅拌不均匀，从而把空气带入蜡浆内，使坯体中出现气泡；②排蜡过程中时间不够充分，料浆中的空气未排除干净，使坯体中出现气泡。改进措施：加长搅拌时间，控制好

蜡浆的流动性；排蜡时改进排蜡工艺制度，充分排除蜡浆中的空气。

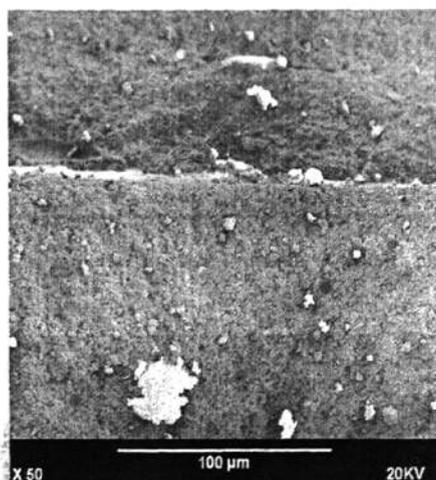


图 7-5 烧结前断面形貌扫描图

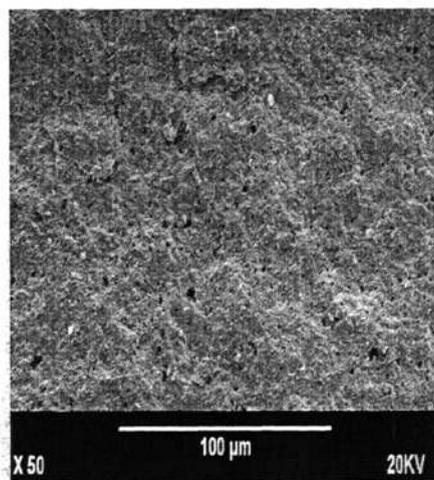


图 7-6 烧结后断面形貌扫描图

Fig. 7-5 SEM micrographs after sintering Fig. 7-6 SEM micrographs after sintering

综上所述，叠层成型不会影响试样的机械强度，而且层与层之间有较好的结合强度，从而验证了蜡浆用于叠层成型的可行性。

7.6 本章小结

本章主要介绍了采用基于石蜡速凝特性的层合速凝快速成型技术方法来制备陶瓷零件的实验过程和结果分析。通过分析制备的陶瓷零件得出基于石蜡速凝特性的层合速凝快速成型技术方法的可行性，从而为该理论提供了实验基础。

8 论文总结

随着科学技术的进步,快速成型技术得到了飞速的发展,现已在领域很多领域得到了广泛应用。特别是陶瓷材料以其良好的力学性能,在航天、能源、机械、电子信息、生物工程等领域得到广泛的应用。但是,目前陶瓷零件的快速成型在国内才处于起步阶段,在国外也尚未成熟,现已有的快速成型技术设备的昂贵,材料的浪费很大程度制约了陶瓷零件快速成型技术的发展和推广。因此,研究开发出适合陶瓷制件快速成型,而且适合我国国情需要的设备就显得尤为重要。针对我国工业基础薄弱,但是数控机床工业普及性较好的特点,设计研究了陶瓷零件快速成型机,并应用开放式数控系统模式“IPC+PMAC”搭建了陶瓷零件快速成型机的数控系统,本文主要设计研究了数控系统的硬件和分析了软件部分重要模块。由于快速成型分层软件往往需要用户自主开发,通用性不强,因此,对于快速成型分层软件如何在数控系统上能够实现其通用性还亟待进一步解决。

致 谢

本论文是在我尊敬的导师高东强教授的悉心指导下完成的。导师严谨的治学态度和朴素的生活作风使我在研究生学习期间受益匪浅，这种治学态度将在我未来的学习和工作过程中仍然起到指导性意义，在此，我衷心感谢恩师的培养。在研究生阶段，高老师无论在工作学习还是在日常生活方面都给予了我很多热情的指导以及亲切的关怀，再次向高老师表示最诚挚的谢意，并致以最崇高的敬礼。

在课题研究中，高老师对知识的驾驭能力、严谨的治学态度和求实的工作作风给了我深深的启迪，使我在研究生学习期间获益匪浅，也将对我今后的工作和学习产生巨大影响。高老师一丝不苟的工作作风、虚怀若谷的风范和与人为善、宽厚热情的做人品质将永远是我学习的榜样，激励我自强不息、奋发向上！在这三年里，导师不仅使我懂得了如何做学问，更重要的是使我懂得了如何做人，为我指明了未来努力的方向。

在论文完成过程中，还得到了夏田教授的指导和帮助，杨万莉师姐、郭楠、邢海龙、郝大建、南京理工大学的刘胤以及郭文举等同学也给予了论文许多建设性意见和建议，在此一并向他们表示最深切的谢意！同时，也感谢研机电 061 班的所有同学，谢谢你们陪伴我度过了三年美好的时光！

最后，谨向在百忙中抽出宝贵时间评审论文和参加答辩的各位专家、学者致以诚挚的敬意！

参考文献

- [1]王秀峰, 罗宏杰. 快速原型制造技术[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2001.
- [2]F. B. Prinz, et al, JTEC/WTEC Panel on Rapid Prototyping in Europe and Japan [J], vols.1-2, 1997.
- [3]C. J. Luis, J. Vivancos, et al, comparative analysis of injection systems for manufacturing parts[J], Journal of Materials Processing Technology, 143-144(2003)112-117.
- [4]P. Kulkarni, D. Dutta, on the synthesis of layered manufacturing and material removal processes, in Proceedings of the 31st CIRP International Seminar on Manufacturing Systems, 1998, 152-158.
- [5]R. L. Rhorer, K. K. Jurrrens, B. N. Damazo, Evaluating the performance of rapid prototyping/rapid manufacturing systems, in Proceedings of the 31st CIRP International Seminar on Manufacturing Systems, 1998, 141-145.
- [6]沈国强. 几种常用快速原型制造技术的分析及比较[J]. 现代机械, 1998(3): 14-18.
- [7]K.P.Karunakaran,P.Vivekananda Shanmuganathan,Sanyay Janardhan Jadhav,et al[J]. Rapid Prototyping of Metallic Parts and MouldsJournal of Materials Processing Technology, 2000, 105:371-381.
- [8]单联娟. 陶瓷器件的快速原形制造技术研究进展[J]. 江苏陶瓷, 2005, 38(3): 14-17.
- [9]孙勇. 一种新的陶瓷部件快速成形技术及材料性能研究[D]. 咸阳: 陕西科技大学, 2005.
- [10]CXF. Lam, X.M. Mo, S.H. Teoh, et al. Scaffold Development Using 3D Printing with a Starch-based Polymer [J]. Materials Science and Engineering, 2002, (C20):49-56.
- [11]薛义丹, 徐廷献, 郭文利, 等. 注凝成形(gelcasting) 工艺及其新发展[J]. 硅酸盐通报, 2003, (5): 69-73.
- [12]黄勇, 向军辉, 谢志鹏, 等. 陶瓷材料流延成形研究现状[J]. 硅酸盐通报, 2001, (4): 22-27.
- [13]谢志鹏, 黄勇. 凝胶铸技术在陶瓷成形应用中的新发展[J]. 陶瓷学报, 2001, 22(3): 142-146.
- [14]杨万莉, 王秀峰, 江红涛, 等. 陶瓷制件层合速凝快速成型技术研究进展[J]. 硅酸盐通报, 2007, 26(2): 328-331.

- [15]杨万莉,王秀峰,江红涛,等.基于快速成型技术的陶瓷零件无模制造[J].材料导报,2006,20(12):92-95.
- [16]易中周,黄勇,谢志鹏.凝胶注模成形氧化锆耐火材料的研究[J].耐火材料,2002,36(1):9-12.
- [17]杨金龙,黄勇,司文捷,等. α - Al_2O_3 直接凝固注模成形工艺的研究[J].硅酸盐学报,1997,25(5):514-519.
- [18]周龙捷,许兴利,黄勇,等.水基高固相含量SiC悬浮体的制备和凝胶注模成形[J].高技术通讯,2000,(7):100-103.
- [19]刘伟军等.快速成型技术及应用[M].北京:机械工业出版社,2005.
- [20]Wang S huhai, Jang J H, Schulze W A. Rapid Prototyping of Ceramic Components by Slurry Jet Printing[J]. JOURNAL OF THE CHINESE CERAMIC SOCIETY. 2001, 29(4): 344-349.
- [21]胡庆夕,周克平等.快速制造技术的发展与应用[J].机电一体化,2003(5):6~11.
- [22]Ju"rgen Stampfl, Hao-Chih Liu, Seo Woo Nam, Rapid prototyping and manufacturing by gelcasting of metallic and ceramic slurries[J]. Materials Science and Engineering, 2002, A334: 187-192.
- [23]Ajantha K. Egodawatta, D.K. Harrison. Feasibility study on developing productivity and quality improved layered manufacturing method for rapid prototyping tooling manufacture [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2004, 149: 604~608.
- [24]陈世柱.快速原型技术及其在复合材料成形方面的应用[J].中南工业大学学报,2002,23(5):166-169.
- [25]王隆太.先进制造技术[M].北京:机械工业出版社,2003.
- [26] M. L. Griffith, J. W. Halloran. Freeform fabrication of ceramics via stereolithography [J]. J. Am. Ceram. Soc., 1996, 79(10):2601-2608.
- [27]C. Hinczewski, S. Corbel, T. Chartier. Stereolithography for fabrication of ceramic three-dimensional parts [J]. Rapid Prototyping Journal, 1998, 4(3):104-111.
- [28]G. Brady, J. Halloran. Stereolithography of ceramic suspensions. Rapid Prototyping Journal, 1997, 3(2):61-65.
- [29]D. L. Bourell, H. L. Marcus, J. W. Barlow, et al. Selective laser sintering of

- metals and ceramics[J]. *International Journal of Powder Metallurgy*, 1992, 28(4):369-382.
- [30]R. Goodridge, K. Dalgarno, D. Wood. Indirect selective laser sintering of an apatite-mullite glass-ceramic for potential use in bone replacement applications[J]. *Proceedings of the I MECH E (Part H), Journal of Engineering in Medicine*, 2006, 220(1):57-68.
- [31]J. P. Kruth, S. Kumar, J. Van Vaerenbergh. Study of laser-sinterability of ferro-based powders[J]. *Rapid Prototyping Journal*, 2005, 11(5):287-293.
- [32]J. Lorrison, K. Dalgarno, D. Wood. Processing of an apatite-mullite glass-ceramic and an hydroxyapatite/phosphate glass composite by selective laser sintering [J]. *Journal of Materials Science: Materials in Medicine*, 2005, 16(8):775-781.
- [33]J. P. Kruth, P. Mercelis, J. Van Vaerenbergh, et al. Binding mechanisms in selective laser sintering and selective laser melting [J]. *Rapid Prototyping Journal*, 2005, 11(1):26-36.
- [34]S. Rangarajan, G. Qi, N. Venkataraman, et al. Processing, rheology, and mechanical properties of feedstock for fused deposition of Si_3N_4 Ceramics [J]. *Journal of the American Ceramic Society*, 2000, 83(7):1663-1671.
- [35] J. Darsell, S. Bose, H. L. Hosick, et al. From CT scan to ceramic bone graft [J]. *Journal of the American Ceramic Society*, 2003, 86(7):1076-1082.
- [36]Greulich M, Greul M Pintat T, et al. Fast functional prototypes via multiphase jet solidification [J].*Rapid Prototyping Journal*, 1995, 1(1): 20-25.
- [37] C. Hinczewski, S. Corbel, T. Chartier. Stereolithography for fabrication of ceramic three-dimensional parts [J]. *Rapid Prototyping Journal*, 1998, 4(3):104-111.
- [38] Seerden K A M, Smith B R, Goucko W, et al. Direct ink-jet deposition of ceramic green bodies [A]. *Abstracts for MRS Fall Meeting[C]*. Boston, MA, USA, 1998.
- [39] E. Sachs, P. Williams, D. Brancazio, et al. Three dimensional printing, rapid tooling and prototypes directly from a CAD model [J]. *Proc. Manuf. Int.*, 1990, 90(4):131-136.
- [40] E. Sachs, M. J. Cima, J. Bredt. Three dimensional printing of ceramic shells and cores for metal casting [J]. *Intelligent Design and Manufacturing for*

- Prototyping, Am. Soc. Mech. Eng., 1991, (50):61-72.
- [41]王秀峰,江红涛,孙勇,等.一种陶瓷零件的快速成型方法[P].中国发明专利,专利号:CN200510041976.4,2005.
- [42]王秀峰,单联娟,江红涛,等.一种陶瓷零件的快速制备方法[P].中国发明专利,专利号:200510043175.1,2005.
- [43]王秀峰,于成龙,江红涛,等.一种陶瓷零件的快速制造方法[P].中国发明专利,专利号:200510043174.7,2005.
- [44]王秀峰,江红涛,于成龙,等.一种陶瓷零件的快速制备方法[P].中国发明专利,专利号:200510043176.6,2005.
- [45]卢胜利等,现代数控系统[M],机械工业出版社,2006年6月第一版.
- [46] Delta Tau Data System Inc.PMAC User's Manul.2003.
- [47] 北京元茂兴设备技术有限责任公司.PMAC用户手册[Z].2001.
- [48] PMAC Introduction Manual.Delta Tau Data Systems Inc.2004.
- [49] PMAC-PC Hardware Reference Manual.Delta Tau Data Systems Inc.2003.
- [50]孟淑娟,高世一,刘建伟.基于开放式数控系统软件开发[J].机械设计与制造.2006,(11):49-51.
- [51]张清,周艳玲.数控机床进给系统交流伺服电机选择[J].制造技术与机床,1998,7:18-20
- [52]遇天志.开放式数控工作台开发[D].西安交通大学硕士论文,2002.3.1.
- [53]孙卫青,机电一体化技术课程实验指导书,2005.5.
- [54]高慧莹.200mm全自动探针测试台工作台控制系统的研究[D].华中科技大学硕士论文,2006.10.26.
- [55]徐建明.PID控制器及其设计方法研究[D].浙江工业大学硕士论文,2002.12.
- [56]李长胜,赵敬云.RP技术在新产品快速开发中的应用[J].锻压技术,2002(4):44-47.
- [57]基于 PMAC 的微型机床数控系统的研究[D].哈尔滨工业大学硕士论文,2006.6.
- [58].Delta Tau Data System Inc. PMAC PMACTUNINGPRO [M], U SA: DELTA TAU Data System Inc, 1997, 21-30.
- [59]申宇,马伯渊,张金楼.基于 PMAC 卡的高速数据采集[J].机电工程技术.2006,35(2):96-97.
- [60]马静,刘延章,朱虹.基于 PMAC 的快速成型轮廓运动控制研究[J].机械设

计与制造.2007, (1) :27-29.

[61]石振华. PID 的自整定控制及研究[D].内蒙古科技大学硕士论文,2008,6.

[62]罗朝盛.Visual Basic 6.0 程序设计实用教程.清华大学出版社,
2004:238~246.

附录 A

IPC九针串口

IPC	RXD 2脚	TXD 3脚
	TXD 3脚	RXD 5脚
	GND 5脚	GND 9脚
		33脚

100欧电阻	手动指示灯	31脚
100欧电阻	自动指示灯	29脚
100欧电阻	X轴指示	27脚
100欧电阻	Y轴指示	25脚
100欧电阻	X轴原点指示	23脚
100欧电阻	Y轴原点指示	21脚
100欧电阻	暂停指示	19脚
		17脚

S1	X/Y轴	15脚
S2	手动/自动选择	13脚
S3	回原点	11脚
S4	暂停	9脚
S5	J+	7脚
S6	J-	5脚

100欧电阻	X轴报警指示	6脚
100欧电阻	X轴正向驱动禁止输入	8脚
100欧电阻	X轴反向驱动禁止输入	10脚
100欧电阻	Y轴正向驱动禁止输入	12脚
100欧电阻	Y轴负向驱动禁止输入	14脚
100欧电阻	Y轴伺服准备好指示	16脚
100欧电阻	Y轴报警指示	18脚
100欧电阻	X轴伺服准备好指示	4脚

S9	X轴启动	3脚
S10	X轴停止	5脚
S11	X轴暂停	7脚
S12	X轴回原点	9脚
S13	Y轴启动	11脚
S14	Y轴停止	13脚
S15	Y轴暂停	15脚
S16	X轴回原点	17脚

接光栅

A3	1脚
A3/	2脚
B3	3脚
B3/	4脚
C3	5脚
C3/	6脚

JRS232

J5 (JOPTO)

J3 (JTHW)

PMAC-PC

JMACH

AGND	58脚	Vref	22脚
CHA1	25脚	FFA	9脚
CHA1/	27脚	*FFA	10脚
CHB1	21脚	FFB	11脚
CHB1/	23脚	*FFB	12脚
CHC1	17脚	FFC	23脚
CHC1/	19脚	*FFC	24脚
DAC1	43脚	CA	7脚
DGND	3脚	*CA	8脚
DAC1/	58脚	CB	20脚
DGND	3脚	*CB	21脚

AGND	58脚	Vref	22脚
CHA2	26脚	FFA	9脚
CHA2/	28脚	*FFA	10脚
CHB2	22脚	FFB	11脚
CHB2/	24脚	*FFB	12脚
CHC2	18脚	FFC	23脚
CHC2/	20脚	*FFC	24脚
DAC2	44脚	CA	7脚
DGND	4脚	*CA	8脚
DAC2/	46脚	CB	20脚
DGND	4脚	*CB	21脚

AGND	58脚		
+LIM1	51脚	X	正向相位
-LIM1	53脚	X	负向相位
HMFL1	55脚	X	向原点
+LIM2	52脚	Y	正向相位
-LIM2	54脚	Y	负向相位
HMFL2	56脚	Y	向原点

交流伺服驱动器X

CN1端子

电源输出

U	1脚
V	2脚
W	3脚
GND	4脚

交流伺服驱动器Y

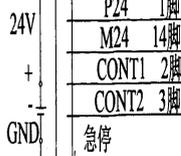
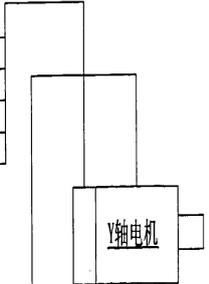
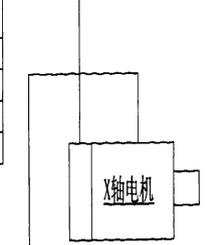
CN1端子

电源输出

U	1脚
V	2脚
W	3脚
GND	4脚

外壳	屏蔽	3脚
SIG	17脚	SIG 4脚
SIG	18脚	SIG 5脚
P5	3脚	P5 7脚
M5	1脚	P5 8脚

外壳	屏蔽	3脚
SIG	17脚	SIG 4脚
SIG	18脚	SIG 5脚
P5	3脚	P5 7脚
M5	1脚	P5 8脚



附录 B

攻读学位期间发表的学术论文目录

- [1] 高东强,田振亚,郝大建等.基于 ANSYS 的丝杠动态特性分析研究[J]. 起重运输机械, 2008,(11): 54-57.
- [2] 高东强,田振亚,郝大建等.陶瓷零件快速成型机控制系统[J]. 机床与液压, 2008,36(10):217-219.
- [3] 高东强,田振亚,姚素芬等.基于表面工程技术的凸轮材料表面改性处理[J]. 陕西科技大学学报, 2008,26(1):154-158.
- [4] 高东强,田振亚,郝大建等.陶瓷零件快速成型机铺料机构控制系统的研究[J]. 工程设计学报, 2008,15(3):229-232.
- [5] 田振亚,高东强,郑梅等.高效气动套管自动补贴装置金属锚锥度角设计[J]. 模具技术, 2008,6(3):6-9.
- [6] 田振亚,高东强,郭文举等.二维数控工作台设计[J]. 机械设计与制造, 2009,(2):179-180.
- [7] 高东强,田振亚,郝大建等.陶瓷零件快速成型机铺料机构的 PLC 控制[J]. 机械设计与制造, 2008, (9):174-176.