

文章编号: 1002-0446(2001)05-0442-05

磁悬浮伺服的机器人装配夹具及其智能控制*

谢存禧 颜波 张铁

(华南理工大学机电工程系 广州 510640)

摘要: 首先,设计了一种新型磁悬浮伺服的机器人装配夹具.描述了其结构和静力分析;绘制了机器人装配系统示意图.其次,分析了磁悬浮伺服夹具的智能控制.描述了其静态平衡控制;选择了合理的间隙传感器、电磁铁、功率驱动电路、A/D 和 D/A 转换电路作为控制电路的硬件;采用基于 CMAC 的神经网络控制作为主动柔顺智能控制方式.然后,根据神经网络控制算法应用 VC++ 语言和 MATLAB 软件混合编程.给出了在 VC++ 中实现 DLL 编程和通过 VC++ 调用 MATLAB 的方法.

关键词: 磁悬浮夹具;神经网络控制;机器人;装配

中图分类号: TP24 **文献标识码:** B

MAGNETIC LEVITATION SERVO FIXTURE FOR ROBOTIC ASSEMBLY AND INTELLIGENT CONTROL

XIE Cun-xi YAN Bo ZHANG Tie

(Department of Mechatronic, South China University of Technology, 510640)

Abstract: Firstly, a new type of magnetic levitation servo fixture for robotic assembly is designed. Its structure and static analysis are described; schematic of robotic assembly system is drawn. secondly, intelligent control of the magnetic levitation servo fixture are analyzed. Its control of static balance is described; reasonable gap sensor, electromagnet, power drive circuit, A/D and D/A conversion circuits are selected as hardware of the control circuit; Neurocontrol based on CMAC is adopted as intelligent control method of active compliance. Thirdly, VC++ combined with MATLAB is applied to programming in virtue of neurocontrol algorithm. Methods of achieving DLL programming in VC++ and calling MATLAB via VC++ are given.

Keywords: magnetic levitation, neurocontrol, robot, assembly

1 引言(Introduction)

在使用机器人进行自动化装配的过程中,由于工件本身的精度、机器人的精度和工装夹具的精度等的影响会产生随机性系统误差,使得装配过程中经常出现卡阻现象,成为制约机器人化装配技术推广应用的瓶颈.为实现装配作业,可采用柔顺技术调整装配件相对位姿,顺应以至消除系统误差.机器人这种对接触环境顺从的能力称为柔顺性.

装配力/力矩能反映出装配件的相对位姿,按是否有力反馈控制,柔顺性分为主动柔顺、被动柔顺和混合柔顺.被动柔顺主要是指机器人与环境接触时

利用弹簧或橡胶的弹性吸收或储存能量从而对外部作用力产生自然顺从,因此存在二阶振荡问题,难以实现高速装配,此外,被动柔顺对大误差缺乏有效性.主动柔顺主要是指控制器通过力传感器反馈信息主动控制机器人手腕或夹具上的附加柔顺装置调整装配件的相对位姿误差,主动柔顺控制分为阻抗控制、力/位混合控制、自适应控制和智能控制四类,时变、强耦合、不确定性和力反馈的输入,使前三类控制模型的建立困难;而智能控制模拟人类智能,无须建模,能较好地解决输入信息之间的互补性、冗余性及容错性^[1].混合柔顺则是将主动柔顺和被动柔顺相结合以解决零件对准问题,但较复杂,基本策略

* 基金项目:中国科学院机器人学开放研究实验室基金(RL199904)和广东省自然科学基金.

收稿日期:2000-12-12

有: 在允许的力/力矩范围内, 零件装配采用被动柔顺; 超过该范围时采用主动柔顺来降低插入力^[2]。

按附加柔顺装置安放位置, 柔顺性分为机器人手腕的柔顺性和装配夹具的柔顺性。由于机器人手腕的柔顺会增加机器人末端的重量, 降低机器人的有效载荷, 因此具有很大的局限性。而通过装配夹具的柔顺来解决机器人化装配中的零件对准问题, 能够克服以上方法的不足。Badano F 等^[3]研制了一种可平面移动的浮动式柔顺夹具, 该夹具在平面上的移动由两个电磁铁驱动, 通过调整电磁铁的电流相位来随机地调整轴孔中心的相对位置。我们曾研制完成一种可重组柔顺性夹具, 是在夹具的浮动平台和固定平台之间采用弹簧联接, 装配时通过装配力使弹簧变形, 实现浮动平台的平面柔顺, 但不能柔顺空间各方向的误差, 有二阶振荡, 系统存在较大的阻力等。

为此, 我们提出了一种全新的磁悬浮伺服的具有空间 5 自由度的机器人装配夹具, 采取主动柔顺神经网络智能控制方法, 以解决装配过程中的零件对准问题。与其它实现柔顺的方式相比, 这种方法具有无摩擦、无润滑、高速度和高加速度、可编程、刚度

可控、精度较高、装配力小、可调整尺寸较大、能控制浮动平台自动回到原有中心位置等优点。

2 磁悬浮伺服的机器人装配夹具的设计^[4] (Design of the magnetic levitation servo fixture for robotic assembly)

2.1 磁悬浮伺服的机器人装配夹具的结构和静力分析

图 1 是磁悬浮伺服的机器人装配夹具的结构示意图。该夹具包括 1 个浮动平台、1 个固定平台、8 个径向电磁铁、2 个轴向电磁铁、4 个径向间隙传感器和 1 个轴向间隙传感器。固定平台安装在工作台上, 8 个径向电磁铁分别对称地安装在固定平台内的左右两侧和前后两侧, 轴向电磁铁对称地安装在固定平台内, 并置于浮动平台浮动盘的上下两侧, 浮动平台通过 10 个电磁铁所形成的磁场浮动于固定平台上。径向间隙传感器也安装在固定平台内, 其中 2 个在左或右的同一侧, 2 个在前或后的同一侧, 轴向电磁铁安装在固定平台下部, 位于浮动平台浮动盘的下侧。

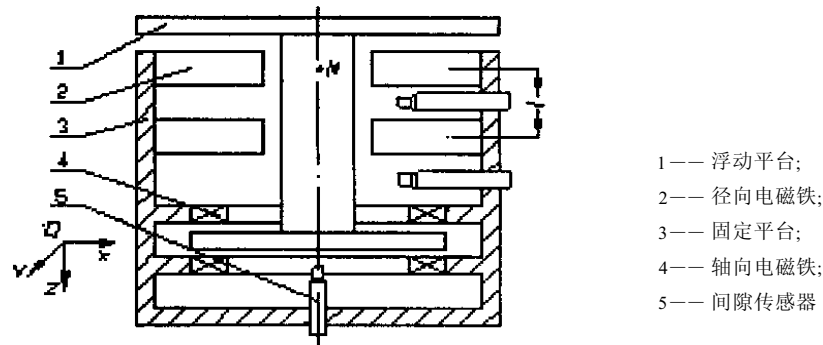


图 1 磁悬浮伺服的机器人装配夹具的结构示意图

Fig. 1 Schematic of structure of the magnetic levitation servo fixture for robotic assembly

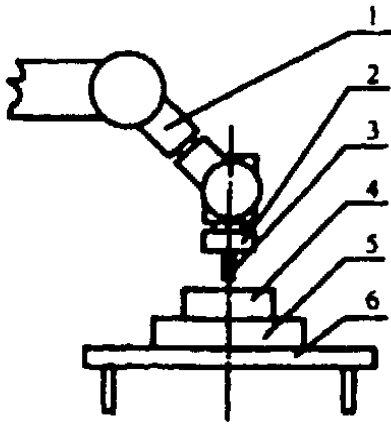
浮动平台在电磁铁所形成的磁场的作用下处于悬浮的平衡位置(中间位置), 这个位置即为初始位置。单个电磁铁磁场吸力与电磁铁的安匝数(即线圈匝数和励磁电流的大小之积)的平方成正比, 与间隙的平方成反比。由于结构的对称性, 径向电磁铁在 x 轴正负方气隙处产生的磁通是相等的。此时两气隙处对浮动平台的吸力相等, 即 $F_1 = F_2$ (F_1 为 $+x$ 方向的吸力, F_2 为 $-x$ 方向的吸力)。同样, y 轴两侧电磁铁对浮动平台的吸力相等, 即 $F_3 = F_4$ (F_3 为 $+y$

方向的吸力, F_4 为 $-y$ 方向的吸力)。对于轴向电磁铁来说, 在 $-z$ 方向气隙处的磁通与 $+z$ 方向气隙的磁通略有不同, $-z$ 方向的磁通略大, 以平衡浮动平台和工件的重量, 即 $F_5 = F_6 + G$ (F_5 为 $-z$ 方向的吸力, F_6 为 $+z$ 方向的吸力, G 为夹具和工件的重量)。

2.2 磁悬浮伺服的机器人装配系统

磁悬浮伺服的柔顺夹具的机器人装配系统如图 2 所示(以最具有代表性的轴孔装配为例)。系统所使用的机器人是 6 自由度的安川机器人 SK-16, 末端

使用六维力/力矩传感器,以检测装配过程中装配力在 x 、 y 、 z 方向上的力和力矩。



1——SK-16 机器人; 2——力/力矩传感器;
3——轴; 4——孔; 5——柔顺性夹具; 6——装配工作台
图 2 磁悬浮伺服的柔顺夹具的机器人装配系统示意图
Fig. 2 Schematic of robotic assembly system including the magnetic levitation servo compliant fixture

根据文献[5]对装配过程中的误差和装配力分析所推导的公式,不难求得各个电磁铁的线圈电流与偏差的关系。据此,通过合理地控制线圈的电流,就可以控制柔顺夹具的位移。

3 磁悬浮伺服夹具的智能控制(Intelligent control of the magnetic levitation servo fixture)

3.1 磁悬浮伺服夹具的静态平衡控制

如果浮动平台在初始位置受到往 $-x$ 方向的扰动力(不是装配产生的装配力)时,浮动平台就会偏离初始位置向 $-x$ 方向运动,此时 x 轴上的径向间隙传感器检测到浮动平台偏离其初始位置向 $-x$ 方向移动,控制器将这一信号进行A/D转换,经过一定的处理后输出,并增大所控制的 x 侧电磁铁电流的数字信号值,减小所控制的 $-x$ 侧电磁铁电流的数字信号值,再经过D/A转换成电流控制信号,经过功率驱动电路放大后将该控制信号转换成控制 x 方向各电磁铁的线圈电流,使得 $-x$ 侧的线圈电流减小, $+x$ 侧的线圈电流增加,从而产生一平衡外力干扰的电磁吸力,两侧气隙处产生的吸力变为 $F_1 \geq F_2$,使得浮动平台重新返回原来的平衡位置。如果浮动平台受到一个往 $+x$ 方向的扰动并往 $+x$ 方向运动,则可得出相反的结论。同理,当浮动平台受到 y

轴方向或 z 轴方向的扰动时,通过间隙传感器的传感并控制 y 轴方向的径向电磁铁或 z 轴方向的轴向电磁铁的电流,同样可使浮动平台回到初始位置。

3.2 控制电路硬件选择

3.2.1 间隙传感器

磁悬浮伺服的柔顺夹具的机器人装配系统的特点决定了间隙传感器必须是非接触式的位移传感器。由于技术上的原因,目前多采用电涡流位移传感器,其灵敏度和线性度等技术指标距离要求有一定的差距。若每自由度采用单个电涡流位移传感器,还会出现由于结构原因而产生的测量误差信号,使控制精度降低。使用两个电涡流位移传感器差动输出虽然可以克服上述缺陷,但成本提高,结构更趋于复杂。电涡流传感器的感应磁场很弱,因此周围存在的杂散磁场对其灵敏度会产生很大的影响,同时也会在信号中夹杂干扰磁场的成份。所以,屏蔽措施是非常必要的。另一种应用较广的是差动电感位移传感器。由理论分析可知,小气隙的电感式传感器其电感量一般很大,有很强的抗干扰能力,不需要特别的屏蔽措施,很适合在系统中应用。我们选用基于差动变压器原理的电感式位移传感器。其优点是:结构简单,输出功率大,信噪比高,灵敏度高,测量精度高以及线性度好^[6]。

3.2.2 电磁铁

电磁铁按结构型式分为E型、U型和罐型三种,U型电磁铁漏磁多,罐型电磁铁较笨重,综合考虑漏磁及结构重量,应采用E型电磁铁结构。电磁铁结构型式还可分为全电磁式和永磁与电磁的混合式,相对而言,虽然全电磁式电磁铁在体积、重量和功耗方面均大于混合式电磁铁,但其控制系统设计简单、价格便宜,适合推广应用^[7]。我们将全电磁式电磁铁成对置于磁悬浮伺服的机器人装配夹具上进行差动控制,当有外力作用于浮动平台时,控制电流在一侧增大,另一侧减小,使其产生的电磁合力为所需的悬浮力。磁悬浮夹具的承载能力决定于电磁铁的线圈匝数和励磁电流的大小,当气隙半径增大时,电磁铁需要的安匝数就大,需要较大的绕线空间^[4]。

3.2.3 功率驱动电路

传统的功率驱动电路有晶闸管式、双极晶体管线性放大式和PWM脉宽调制等多种形式。晶闸管组成的电路虽然简单,但存在“死区”,不适合系统要求调整的快速性;晶体管线性功率驱动电路因功率元件始终处于放大状态,元件发热严重,功耗大、效率低。因此,考虑到磁悬浮夹具驱动控制应具

有快速、高效、宽频带等特点, 选用双极 H 型 PWM 功率驱动电路, 其功率管始终工作在开关状态, 导通时电阻小, 管压降低; 关断时无电流通过. 因此功耗小、效率高. 而且, 在较高的开关频率下, 由于电感的滤波作用, 能获得较平稳的可调电流波形^[8].

3.2.4 A/D 转换电路和 D/A 转换电路

A/D、D/A 转换电路应满足以下要求:

(1) 分辨率 12 位, 采样频率 $\geq 100\text{Hz}$, 至少 11 个通道输入和 10 个通道输出.

(2) 可直接与计算机进行数据传输, 以构成微机数据采集控制系统.

3.3 智能控制方法

智能控制是主动柔顺控制中最先进、最有发展潜力的一种控制方式, 而其中神经网络控制是一种典型的智能控制方法.

以非线性大规模并行处理为主要特征的神经网络, 以生物神经网络为模拟基础, 试图模拟人的形象思维以及学习和获取知识的能力. 它具有学习、记忆、联想、容错、并行处理等种种能力, 已在控制领域得到广泛的应用. 基于神经网络的控制是一种特殊形式的自适应控制系统, 具有适应性、柔软性、鲁棒性和实时性等特点^[9], 具体表现在:

(1) 具有独特的非线性映射能力. 当控制对象的非线性模型不清楚时, 可以通过对神经网络的训练, 掌握其非线性函数关系.

(2) 可以用自联想推理功能解决时变系统的参数自适应问题.

(3) 可以通过在线学习, 及时跟踪不确定系统的变化, 而不需要改变网络的结构和算法.

(4) 神经网络对系统特性的记忆表现为各个神经元之间的连接权值, 单个神经元在整个系统中不起决定性作用. 一个经过训练的神经网络可以按相似输入模式产生相似的输出模式, 系统受到干扰时不影响网络稳定的输出.

(5) 由于神经网络的并行处理模式, 虽然其训练时费时较大, 但在运用时响应速度非常快.

(6) 可用于多变量系统的控制中.

CMAC(即小脑模型关联控制器)是一种通过多种映射实现联想记忆的神经网络, 因其局部逼近, 学习速度快, 满足在线学习的要求, 并且包含了模糊逻辑推理, 所以特别适用于神经控制^[10]. 对于柔顺性装配这一瞬间强非线性时变系统而言, 选用 CMAC 神经网络较为合适, 其收敛速度比 BP 快很多, 且不存在局部极小问题. 其学习算法采用误差纠正算法.

4 神经网络控制方法程序设计 (Programming of neurocontrol method)

根据神经网络控制算法, 采用 VC++ 6.0 语言与 MATLAB5.3 软件在 Windows98 操作系统环境下混合编程, 方便高效.

4.1 VC++ 6.0 中实现 DLL 编程的方法

因动态链接库(DLL)不能独立运行而只能被其他应用程序调用, 故在开发 DLL 应用时, 通常先在 VC++ 中创建一个 EXE 应用程序作为主工程; 再创建一个 DLL 应用作为主工程的子工程, 并在主工程中调用 DLL. 这样, 既可以调试 DLL 本身, 又可以调试与应用程序的接口. 在 VC++ 6.0 中调用 DLL 非常简单, 首先在 EXE 主工程项目设置中链接上相应的 LIB 库文件, 然后将 DLL 文件拷贝到 Windows 的 system 目录下或是应用程序的 debug 目录下, 最后在程序中包含相应的头文件, 这样就可以直接在程序中引用 DLL 中的函数了.

在 VC++ 6.0 中可以快捷方便地生成所需的 DLL 项目, 而且 DLL 编程简单实用易掌握. DLL 模块具有很强的通用性和实用性, 代码的运行效率高, 具有开发周期短、软件容易维护等许多优点, 是一种很好的编程方法. 在微机数据采集与控制系统中, 由于数据采集与控制模块运用频繁, 而且要求实时性好, 响应快. 因此, 可以先利用 VC++ 6.0 开发出功能强大的 DLL 模块, 然后再在多种不同的用户程序中链接调用. 实践证明, 这种方法容易实现, 而且效果很好, 能很好地满足微机数据采集与控制系统的要求^[11].

4.2 通过 VC++ 实现对 MATLAB 的调用

在工程应用中, 我们一般用可视化编程语言 VC++ 编写应用程序, 实现交互界面、数据采集和端口操作等, 但 VC++ 在数值处理分析和算法工具等方面, 其效率远远低于 MATLAB 语言. MATLAB 是功能非常强大的数学软件, 它广泛应用于自动控制、数字信号处理等领域. MATLAB 程序主要由主程序和各种工具箱组成, 其中主程序包含数百个内部核心函数, 工具箱则包括信号处理、神经网络、控制系统、符号数学等丰富的工具箱. 但 MATLAB 的缺点是不能实现端口操作和实时控制. 因此, 若能把两者结合运用, 实现优势互补, 将大大提高编程效率. 如果把 MATLAB 的程序加入到自己的 VC++ 语言编制的程序中, 能显著减少编程的工作量、保证程序

(下转第 480 页)