

飞机制造数控柔性工装伺服驱动组件和控制系统

Servo Drive Component and Control System of Flexible Tooling for Aircraft Manufacturing

北京航空航天大学机械工程及自动化学院 靳 阳 郇 极

[摘要] 研究了基于标准伺服驱动组件的飞机制造数控柔性工装结构和控制系统,分析了典型柔性工装的结构布局及用途,提出采用标准化的伺服驱动组件和模块化设计技术,能够简化柔性工装结构,缩短制造周期。开发出基于现场总线和一体化伺服驱动单元技术的柔性工装数控系统,使用工业控制编程语言 IEC 61131-3 编写数控系统控制软件。该系统具有系统配置功能,能够满足多种结构柔性工装的控制要求。

关键词: 柔性工装 驱动组件 数控系统

[ABSTRACT] This paper researches the numerical controlled flexible tooling for aircraft manufacture, especially its structure and control system based on the standard servo drive components. The mechanism and usage of typical flexible tooling are analyzed. The technology of modular design is proposed using universal servo drive components, which can simplify the mechanism and shorten the manufacturing time of flexible tooling. The CNC system for flexible tooling is developed based on the technology of field bus and integrated servo drive unit. The control software of CNC system is created by IEC 61131-3 programming languages of industrial control. This system shows the function of system configuration feature, which can satisfy the controlling requirements of flexible toolings with a variety of mechanism.

Keywords: Flexible tooling Servo driven component CNC system

数控柔性工装是一种先进的飞机制造设备,它将数控机床中使用的可编程运动控制技术用于飞机装配型架、对合型架和加工夹具等,控制定位器的精确定位。数控柔性工装能够替代传统的固定工装,一套工装可以用于多种型号飞机生产并可以重复使用,减少工装数量,缩短生产准备时间,减少工装存储占用场地^[1-2]。

此外,数控柔性工装也是飞机数字化设计和制造体系的末端执行设备,是构建该体系的重要组成部分。

近年来,机械制造领域以数控技术为基础的自动化技术发展迅速,形成了标准通用运动部件体系,利用这

些通用部件,可以快速设计和制造出各种自动化设备和自动生产线。极大地缩短了设备的设计制造周期,降低了制造成本。

本文研究使用通用标准运动组件构建飞机制造柔性工装的相关技术,使用通用运动组件构成数控柔性工装的基础部件,如立柱-推杆、支臂等。研究开发出适用于数控柔性工装控制的数控系统,系统通过现场总线可以控制多达 128 个伺服电机。通过参数配置,可以构成适合各种类型的装配型架、对合型架、加工夹具等柔性工装控制系统。

1 柔性工装伺服驱动组件

直线驱动组件是最典型的驱动组件,在常规机械制造领域已用于制造生产线、小型机床等。伺服驱动组件是以伺服电机为动力的直线驱动组件,可在数控系统控制下实现精确直线运动,适用于柔性工装控制。当用于构建柔性工装机械本体时,可以实现柔性工装的直线运动和工装调形的数字量驱动,有利于柔性工装机械结构的简化和统一,降低制造成本、缩短研制周期,符合模块化设计、制造的思想。4 类直线驱动组件可用于柔性工装制(图 1)。

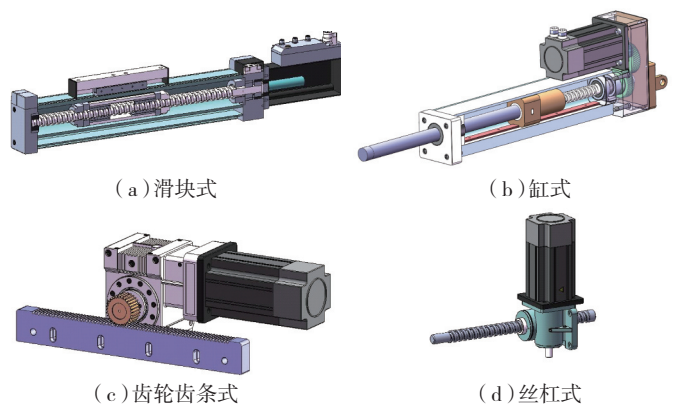


图1 直线驱动组件
Fig.1 Linear actuator

2 柔性工装机机械结构

2.1 柔性工装机机械结构分析

通过总结国内外柔性工装实例,可将柔性工装机械结构分解为5个组成部分:底座、滑台、立柱-推杆、支臂和定位器,如表1所示。

表1 柔性工装结构分解

柔性工装组成部分	自由度个数	功能
底座	0	基础,保证型架准确度
滑台	1~2	提供空间 1~3 个直线自由度以及冗余自由度
立柱-推杆	1~2	
支臂	1~2	
定位器	不确定	依具体情况设计

底座是柔性工装设备的基座,是型架准确度的保证。滑台结构具有 1~2 个相对于底座的直线自由度,可平行于底座平面运动。立柱-推杆固定在滑台上,具有 1~2 个直线自由度。支臂安装在立柱-推杆上,具有 1~2 个直线自由度,可沿立柱-推杆移动或伸缩,作为对滑台和立柱-推杆自由度的补充;根据设计需要,立柱-推杆、滑台支臂可以实现空间 1~3 个直线自由度。定位器类似于传统装配型架的接头定位器,用于与飞机零部件对接或支撑,实现定位功能;自由度个数不确定,可根据零部件装夹的需要灵活设计,常见的有万向真空吸盘结构、夹持结构或推力支撑结构等。上述 5 部分及其自由度可根据具体生产需求协调设置。

2.2 典型柔性工装

图 2 给出了 3 类典型数控柔性工装的结构^[3-4],以及使用 4 种标准伺服驱动组件构成柔性工装的示例,包括图 2 (a) 所示多点夹具和多点模具^[5],图 2 (b) 所示壁板装配柔性工装^[6],图 2 (c) 所示曲面零件通用柔性工装。

3 柔性工装数控系统

北京航空航天大学数控和伺服技术实验室根据柔性工装技术的需要,开发出了用于数控柔性工装的数控系统^[3,7]。系统包括系统硬件与数控软件。其中,硬件结构适合控制具有不同机械结构的多种柔性工装,采用了现场总线技术和一体化伺服驱动单元技术;数控系统软件提供了配置功能,针对某一特定柔性工装控制对象,修改对应参数,快速生成满足该柔性工装设备需求的数控系统。该系统最多可控制 128 个坐标轴,可以分组控制多台设备或柔性工装单元部件。

3.1 硬件结构

柔性工装数控系统硬件由工业控制计算机 IPC (Industrial PC)、现场总线 and 一体化伺服驱动单元组成,其组成结构如图 3 所示。

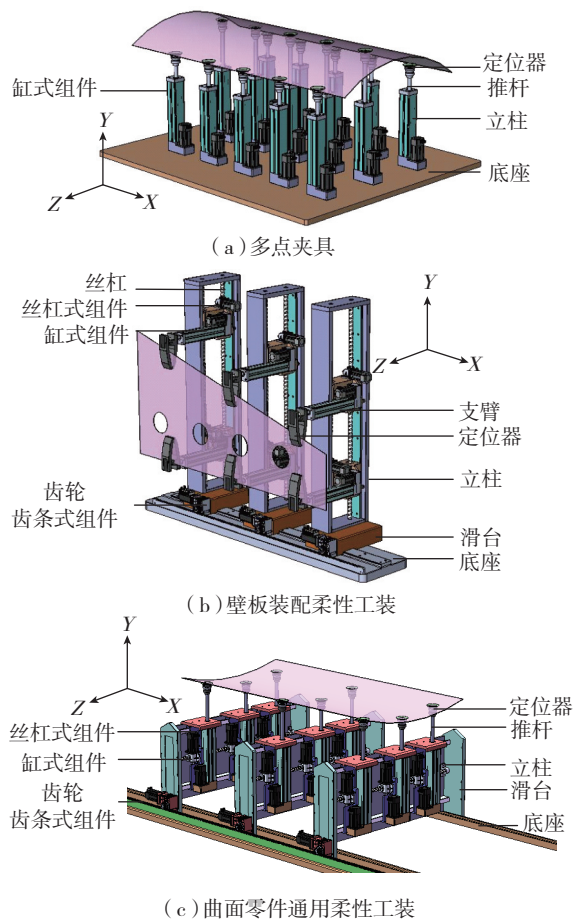


图2 典型柔性工装结构示例

Fig.2 Typical mechanism of the flexible tooling

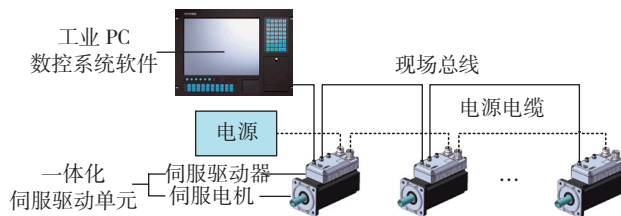


图3 数控系统硬件结构

Fig.3 Hardware architecture of CNC system

IPC 集成了现场总线接口,通过现场总线连接伺服装置。在工程中,可以采用 EtherCAT 工业以太网现场总线或 CAN 总线连接数控系统和一体化伺服驱动单元,便于系统的维护与扩展,并可满足各种类型的柔性工装控制要求。

当数控系统配置柔性工装机械本体时,选用一体化伺服驱动单元作为伺服驱动组件与数控系统中伺服装置的优选方案。一体化伺服驱动单元集成有伺服电机与伺服驱动器,适用于构建柔性工装等大型自动化设备的控制系统。由于省略了伺服电机与伺服驱动器之间的动力电缆与电机编码器反馈电缆,大大简化了整个控

制系统的电缆布线,便于系统的布局、安装和维护。

在实际工程中,数控系统还包括数字 IO 模块,与 IPC 和伺服装置通过现场总线连接,用于控制传感器或其他输入输出装置。

3.2 软件结构

典型的数控系统应该具备 3 类基本控制功能,包括:运动和 PLC 控制、数控系统状态管理及控制、人机界面 (Human Machine Interface, HMI) 控制。

数控系统软件是运行在 IPC 平台上的软件系统,用于实现全部数控功能。数控系统的软件结构及各模块功能如图 4 所示^[7]。数控系统软件由主控制、系统操作和运行控制 2 个软件处理任务组成,使用操作命令接口 O、系统信息接口 I、参数接口 P、显示接口 D。2 个软件处理任务及功能如下:

(1) 系统操作和运行控制,见图 4 (a): 提供人机操作界面、系统数据管理和运行管理功能。通过显示信息接口 D 获得其他功能模块的信息,用于系统状态显示;通过参数接口 P 为其他功能模块提供系统参数;通过操作命令接口 O 向其他功能模块发出运行控制命令;通过系统信息接口 I 从其他功能模块获得系统运行状态,同步系统的运行。

(2) 主控制,见图 4 (b): 该任务在系统操作和运行控制任务的控制下运行。当数控系统处于自动运行工作模式时,NC 调形程序经译码器译码,转换为 2 种类型的数据并分别处理。其中,一种为运动控制数据,经过插补、误差补偿、传动匹配模块,产生坐标轴的运动指令,控制工装的调形运动;另一种为辅助功能数据,控制工装的辅助功能,例如真空吸盘动作、夹持动作等。当

数控系统处于手动运行工作模式时,手动调形模块产生手动进给控制数据,用于柔性工装的手动操作。现场总线驱动模块实现数控系统硬件与伺服驱动、工装辅助设备的数据通信。

3.3 数控系统软件实现

柔性工装数控系统采用 IEC 61131-3 工业控制编程语言编写,与传统数控系统相比具有方便多平台移植、软件结构清晰、功能易扩展等优势。

IEC 61131-3 是国际电工委员会 (International Electro-Technical Commission, IEC) 制定的工业控制编程语言国际标准,也是当前国际上最先进的工业控制编程语言,主要用于编写可编程逻辑控制器 (Programmable Logic Controller, PLC) 的控制程序。世界主流工业控制产品制造商已采用 IEC 61131-3 规定的编程语言作为其产品开发的标准编程语言。因此,柔性工装数控系统可以快速实现多平台移植,即经过较少的工作量,使软件系统工作在符合 IEC 61131-3 标准的不同品牌的 PLC 硬件平台。

IEC 61131-3 标准规定的编程语言支持先进软件开发方法,如支持模块化编程和图形化编程,增强了编程语言的功能,提高了软件开发的效率,并强化了程序封装的概念。柔性工装数控系统软件采用 IEC 61131-3 规定的功能块图语言 (Function Block Diagram, FBD) 与结构化文本语言 (Structure Text, ST) 联合编程的开发方法: 由 FBD 直观地实现如图 4 所示的软件架构,将控制功能划分、封闭在功能块内;在功能模块内部,采用 ST 语言实现复杂的控制功能。

功能模块之间采用清晰的数据连接和传递,构成系统。可以方便地集成由 IEC 61131-3 语言编写的、符合数据连接和传递规则的程序功能模块,规范了功能模块的更换、增加和去除。在 IEC 61131-3 标准的规定下,使数控系统软件成为具有开放式特征的数控系统,用户可以在系统软件中集成新功能模块或替换原有的模块。有利于不同技术分工的工程师在数控系统软件全生命周期中共同完成系统开发、实施应用、调试维护及用户自定义开发等工作,有利于针对特定柔性工装设备开发具有特征功能和个性化功能的数控系统。

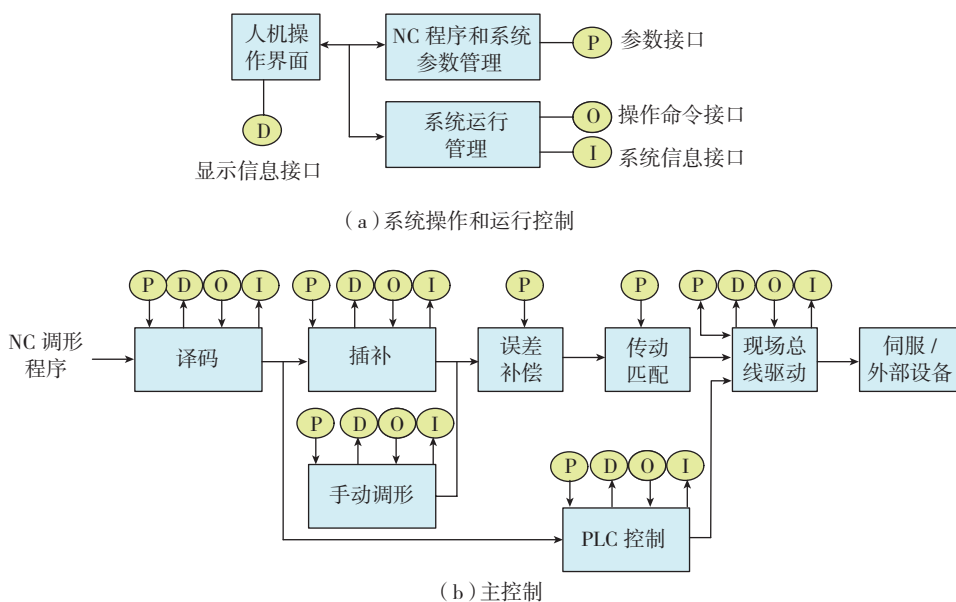


图4 数控系统软件结构

Fig.4 Software architecture of CNC system

基于软 PLC 技术,由 IEC 61131-3 语言开发的数控系统可以在 IPC 平台运行。软 PLC 技术是将 PLC 系统作为一个软件模块运行在计算机平台,其实时性和资源由计算机的性能保证,是当今 PLC 技术的重要发展方向。

3.4 数控系统轴配置和分组

柔性工装数控系统提供了轴配置功能,用于控制轴的分组,适用于多种柔性工装机械结构的控制^[3]。轴配置功能确定了坐标轴名、逻辑轴号和物理轴号之间的映射关系和分组,轴配置原理如图 5 所示,轴配置的映射关系如表 2 所示。逻辑轴号包含了坐标轴在数控系统软件中计算、控制的分组信息,应用在数控系统软件内部。物理轴号为现场总线硬件地址,应用数控系统软件中的传动匹配和现场总线驱动模块中。

数控系统的传动匹配模块确定了轴配置的映射关系,最终由现场总线驱动模块将运动控制指令发送给对

表2 数控系统轴配置映射表

序号	逻辑轴号	坐标轴名	物理轴号
1	L1.1	X1	P1
2	L1.2	Y11	P3
3	L1.3	Z11	P2
4	L1.4	Y12	P5
5	L1.5	Z12	P4
6	L1.6	Y13	P7
7	L1.7	Z13	P6

应的伺服设备,完成对柔性工装的调形运动控制。

3.5 表格式数控编程代码

柔性工装数控系统采用表格式数控编程代码。与常用的 G 代码数控编程相比结构清晰,更适于编写具有较多坐标轴的柔性工装定位程序。表格式编程代码中包含如下元素:程序段号、坐标轴名、调形定位位置值、调形运动速度值、位置补偿值。表 3 中给出了 3 个坐标

表3 表格式数控编程代码

段号	坐标轴名	位置/mm	速度/(mm·min ⁻¹)	补偿/mm
1	X1	800.000	500	0.21
2	Y11	500.000	500	0.35
3	Z11	100.000	500	0.47

轴定位运动的程序示例。

4 应用

飞机装配数控柔性多点工装^[4]由数控系统控制工装定位支点的运动,能够完成某型号系列飞机多种壁板类零件的装配,并已经应用于某航空制造企业,如图 6 所示。该工装的数控系统软件采用 IEC 61131-3 工业控制编程语言实现,具备轴配置和分组功能,并采用表格式数控编程代码;但是,数控系统软件采用了常规设计方法,未采用功能块图语言对数控功能进行模块化封装。该工装的少部分机械结构应用了标准伺服驱动组件(齿轮齿条式),其余大部分结构的设计和制造为常规方法完成。基于已有的工程经验和理论基础,本文论述的机械结构和数控系统设计方法优势明显,并将用于新一轮的柔性工装设计和工程中。



图6 飞机装配数控柔性多点工装

Fig.6 Skin-stringer assembly NC fixture

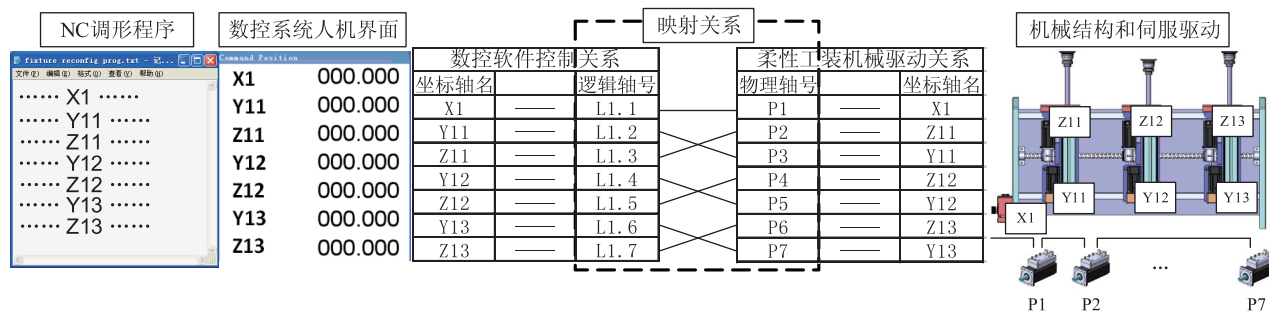


图5 数控系统轴配置和分组

Fig.5 Axis configuration and grouping of CNC system

(下转第 82 页)

表4 估算结果

实际值 /min	SLFM 网络	BP 网络
	估计值 / 相对误差	估计值 / 相对误差
205	200 / 2.4%	221.7 / 8.1%

小于 BP 网络的误差限,而学习迭代次数却仅为 BP 网络的 1/11,同时网络的估算结果也远精确于 BP 网络。

3 网络参数对学习速度和精度的影响

图 3 为奖惩系数 β 对迭代次数的影响。当 $\beta=0.1\sim 0.2$ 时,迭代次数最少;均方根误差和最大误差均为 0。图 4 为权向量修正函数的系数 k_a 对迭代次数的影响。当 k_a 取不同数值时,迭代次数变化很大。 k_a 值过大,则迭代次数急剧增加。 k_a 值的最佳取值范围为 $0.2\sim 0.3$ 。

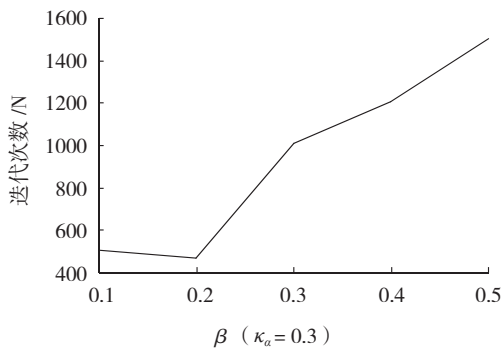


图3 奖惩系数 β 对网络性能的影响

Fig.3 The impact of β against network performance

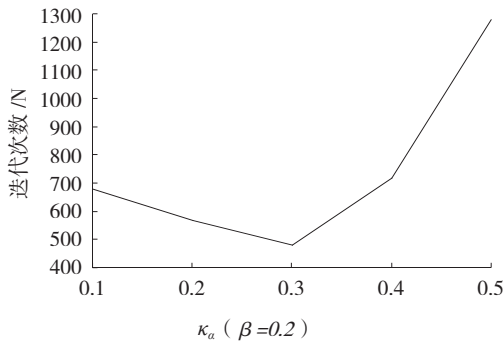


图4 系数 k_a 对网络性能的影响

Fig.4 The impact of k_a against network performance

4 结论

本文针对航空发动机叶片建立了工时估算影响因素体系,给出了匹配相似零件集的检索规则和算法,并应用有监督线性特征映射网络(SLFM)模型估算零件工时。研究了网络参数对网络性能的影响,确定了网络参数的最佳取值范围。与 BP 网络对比试验表明,该方法具有计算速度快、估算准确的优点,为解决零件工时的估算问题提供了新的思路。在这个方法中,对网络参数、输入变量

等的最优点和边界条件可作更深入的研究。

参考文献

- [1] 朱历新,周竞涛,高俊杰,等.基于神经网络的工时定额技术研究.机械科学与技术,2004,24(6):702-705.
- [2] 牛永亮,杭文,何杰,等.基于无师 GFMM 神经网络的公路工程工时定额测算方法研究.公路交通科技,2007,24(2):155-158.
- [3] 余本国.BP 神经网络局限性及其改进的研究.山西农业大学学报(自然科学版),2009,29(1):89-93.
- [4] 朱名铨,蔡永霞.有监督线性特征映射(SLFM)网络及刀具磨损量实时估计.西北工业大学学报,1997,15(1):1-6.
- [5] 王波,刘列勋.数控加工零件工时估算的神经网络方法研究.信息技术,2007,(9):97-102.
- [6] 赵爱侠,张振明,田锡天,等.基于典型工艺的航空发动机轴类零件工艺设计方法研究.中国制造业信息化,2007,36(5):42-46.
- [7] 杨青海,祁国宁,黄哲人,等.基于案例推理和事物特性表的零件工时估算方法.机械工程学报,2007,43(5):99-105.

(责编 亦非)

(上接第 51 页)

5 结论

本文提出采用 4 类标准伺服驱动组件作为柔性工装的驱动部件构建柔性工装的方法,简化了柔性工装的开发和制造,实现了柔性工装设计和制造的模块化。开发了适用于柔性工装控制的数控系统,数控系统软件由 IEC 61131-3 标准规定编程语言编写,使系统软件具有开放性;其提供的轴配置、表格式数控代码等功能便于柔性工装的应用;伺服装置采用一体化伺服驱动单元技术,使柔性工装控制系统结构简单、便于维护。相关控制技术已在实际柔性工装的研发中获得应用。

参考文献

- [1] 范玉青.现代飞机制造技术.北京:北京航空航天大学出版社,2001:102-112.
- [2] 王巍,贺平,万良辉.飞机柔性装配技术研究.机械设计与制造,2006(11):88-90.
- [3] Huan J, Jin Y, Xiao W L. CNC system for flexible fixture in aircraft component manufacturing and assembly. Transactions of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics,2012,29(N1),1-8.
- [4] 王亮,李东升,罗宏宇.飞机装配数控柔性多点工装技术及应用.北京航空航天大学学报,2010,36(N5):540-544.
- [5] Modig. Universal holding fixture for skins[EB/OL]. [2009-09-10]. <http://www.modig.se/products/uhf-skin>.
- [6] Jeff A T, Micheal D A, John L H, et al. Flexible high speed riveting machine. Society of Automotive Engineers (SAE) International Journals, 2003, 112(1):362-371.
- [7] 郇极,靳阳,肖文磊.基于工业控制编程语言 IEC 61131-3 的数控系统软件设计.北京:北京航空航天大学出版社,2011.

(责编 深蓝)