

高集成度空间机械臂模块化关节的研制

史士财¹, 谢宗武¹, 倪风雷¹, 刘宏^{1, 2}

(1. 哈尔滨工业大学机器人研究所, 150001, 哈尔滨; 2. 德国宇航中心
机器人与机电一体化研究所, D-82230, 德国威士林)

摘要: 采用大中心孔设计方法成功地研制了高集成度空间机械臂模块化关节。该关节具有多种传感器, 包括位置传感器、力矩传感器、温度传感器等, 它的所有电气系统都集成在关节内部, 包括传感系统、驱动系统、控制系统和电源系统。采用中心孔走线方式实现了关节的内部走线, 避免了空间环境对导线及其传输信号的影响。针对所设计的关节进行了必要的关节性能实验, 结果表明该模块化关节具有高刚度、大负载特点, 其关节的位置输出能精确跟踪期望的轨迹, 位置精度非常高, 达到了 0.01° 。

关键词: 空间机械臂; 模块化关节; 空间环境

中图分类号: TP24 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-987X(2007)02-0162-05

Development of High Integration Modular Joint for Space Manipulator

Shi Shicai¹, Xie Zongwu¹, Ni Fenglei¹, Liu Hong^{1, 2}

(1. Robotics Institute, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China; 2. Institute of Robotics and Mechatronics,
German Aerospace Center, Wessling D-82230, Germany)

Abstract: Based on big central hole design method, a space manipulator modular joint is developed, which includes many sensors, such as position sensor, torque sensor and temperature sensor. All the electrical systems are integrated in the modular joint, including sensors system, driver system, control system and power system. In order to avoid the effect of space environment on the cables and their signals, all the cables are laid through the central hole of the modular joint. The results of joint performance tests show that the modular joint possesses many good abilities, such as high stiffness, big load and very high control precision approaching to 0.01° .

Keywords: space manipulator; modular joint; space environment

关节是空间机械臂的核心组成部分, 由于空间机械臂通常工作在高温差、强辐射、超真空等恶劣的空间环境中, 所以对关节研制工作提出了很多苛刻的要求, 如空间机械臂的导线不能暴露在空间环境中, 空间机械臂关节需要采取一定的热控措施, 以使各元器件处于所要求的温度范围内。鉴于空间发射费用高昂, 需要空间机械臂的关节具有高集成度、紧凑结构、低重量和大负载自重比, 并且应具有一定的感受外界环境的能力^[1]。

空间机械臂关节模块化是一个重要的发展方

向, 这种关节开发费用低, 研制周期短, 系统的可维护性强^[2]。目前, 德国宇航中心(German Aerospace Center, DLR)基于模块化技术开发的第3代轻型、双关节机器人 ROKVISS 已于 2005 年成功登上国际空间站, 加拿大的空间站遥控操作机械臂系统中的机械臂均采用了模块化的研制方法^[2-4]。

基于 ROKVISS 的研制经验, 哈尔滨工业大学与德国宇航中心联合研制了一种小型高集成度空间机械臂模块化关节, 用它可以组成各种构型的空间机械臂, 如图1所示, 其设计特点是: ①驱动系统由

直流无刷电机和谐波减速器构成;②采用多传感器集成系统,使系统具有多种感知功能,如力矩传感器、位置传感器、温度传感器等;③采用高度集成的机电一体化设计思想,重量轻,输出力矩大;④采用中心孔走线;⑤采用实时串行通讯总线结构。

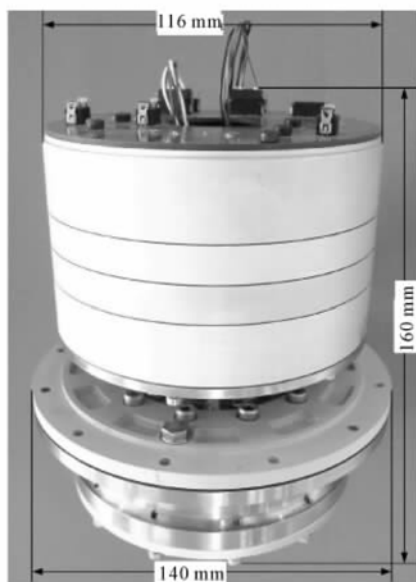


图1 模块化关节实物照片

1 模块化关节的结构设计

在太空环境中,重力几乎为0,重力对机器人关节力矩的影响可以忽略,因此空间机器人的开发通常采用模块化的设计方法。因为采用模块化设计方法不仅易于机器人的设计和修改,而且可以缩短开发周期,降低开发费用,便于系统的维护。

为了获得大输出力矩与自重比,在模块化关节中应采用直流无刷电机和谐波减速器相结合的驱动方式。为了使电缆和插头易于从关节中通过,可采用大中心孔的电机和谐波减速器,本文的大中心孔直流无刷电机如图2所示。考虑到空间环境的特点和空间机械臂能安全可靠地工作,机械臂的零件材料可选择密度小的铝合金,它的加工性、导热性好,能够将关节电子元器件的热量很快传递到壳体。

在模块化关节中,关键的承载零部件都需要进行有限元分析,以获得较高的刚度与强度,同时尽量减轻关节的重量。

模块化关节中的所有的机械零件和电子零部件完全通过3D建模技术进行设计和集成,以便于零部件的加工和装配。模块化关节由关节机械、控制电路和传感器等构成一个高度集成的机电一体化系统,如图3所示。



图2 大中心孔无刷直流电机



图3 模块化关节的组成

2 模块化关节的传感系统设计

一个机器人臂至少需要一套力和位置传感器,使得在自治操作和遥控操作中实现位置和阻抗等的复杂控制。因此,本文的模块化关节集成了包括关节位置传感器、关节力矩传感器和温度传感器等多种传感器,单关节传感器的类型和原理见表1。

表1 单关节传感器类型及原理

编号	传感器类型	数量	原理
1	关节力矩传感器	1	应变原理
2	关节位置传感器	1	电位计
3	关节极限位置开关	1	霍尔效应
4	磁编码器	1	霍尔效应
5	电机位置传感器	1	霍尔效应
6	温度传感器	5	半导体热电阻
7	温度开关	2	双金属片

当空间机器人进行复杂操作时,关节力矩传感器可以保护关节以避免损坏。根据空间机械臂系统对关节力矩传感器的体积、重量、测量范围、灵敏度等方面的具体要求,结合关节本体设计的特点,关节力矩传感器的弹性体结构应设计成轮辐式结构。为了提高传感器测量系统的精度,降低系统的功耗,增强系统抗干扰能力,在力矩传感器设计中利用了微

型高阻金属应变片作为敏感元件,并采用8个应变片组成2个全桥来测量传感器的输出,这样可以补偿温度效应和横向力对传感器的影响^[5],同时采用有限元方法来优化力矩传感器的形状和应变片粘贴的位置.由于其他方向上的力或力矩同样会引起弹性梁在 x - y 平面上的剪切变形,所以势必在传感器信号中会引入干扰.通过有限元分析软件 ANSYS 进行受力分析可以发现,当 x 、 y 和 z 方向受力以及在 x 、 y 轴存在转矩时,在 x - y 平面产生的应变要远小于在 z 轴受转矩产生的应变,关节力矩传感器的有限元分析结果如图4所示.这个传感器由8个横梁组成,其中4个用来粘贴应变片,另外4个用来保护传感器,其上安装了放大、滤波和 A/D 转换的传感器信号调理电路装置.

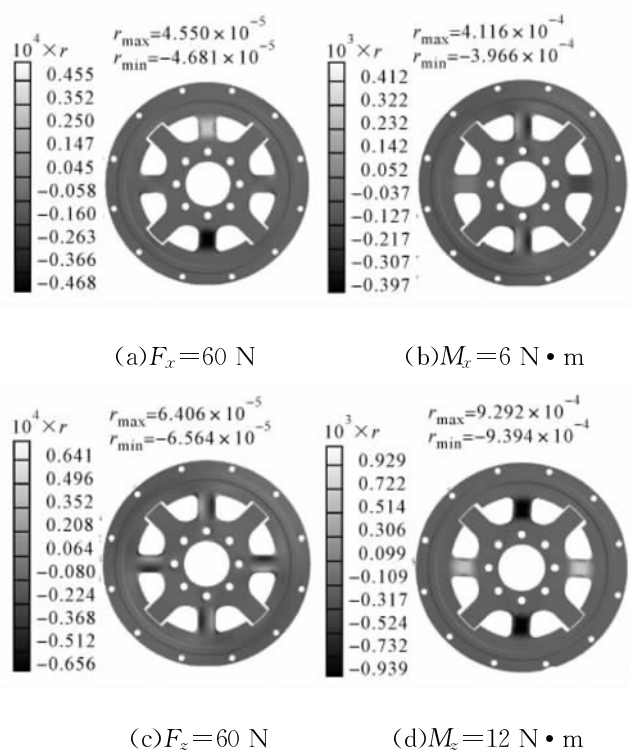


图4 关节力矩传感器的有限元分析结果

为了标定关节力矩传感器的性能,本文设计了一套实验设备.在标定关节力矩传感器的过程中,将施加的载荷和相应的输出电压记录下来,再利用最小二乘算法,得到施加的载荷与输出电压的关系.表2为关节力矩传感器的性能指标.

表2 关节力矩传感器的性能

方向	线性度/%	重复性/%	迟滞/%
x	1.98	0.57	2.24
y	1.73	0.68	2.56

由于使用了谐波减速器和关节力矩传感器,所以增加了关节的柔性,但降低了关节的精度,因此需

要一个绝对的关节位置传感器来测量关节位置.为了实现模块化关节的大中心孔设计,在模块化关节中用电位计作为关节绝对位置传感器,如图5所示.

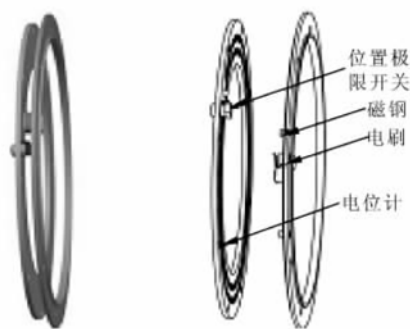


图5 关节位置传感器

在本文中,将数字霍尔传感器和磁编码器作为关节电机的位置传感器,从而提高了关节系统的可靠性,同时实现了电机传感器的冗余设计.利用基于霍尔效应的关节极限位置开关对关节进行保护,可以避免不必要的关节碰撞.另外,在关节中的每块电路板上都集成有温度传感器,以便感受关节内部的温度.

3 模块化关节的控制系统设计

关节控制器主要包括传感器信号处理模块、电机驱动模块、关节控制和通讯模块、关节电源模块等,关节控制系统的结构如图6所示,图7为各模块的电路板.

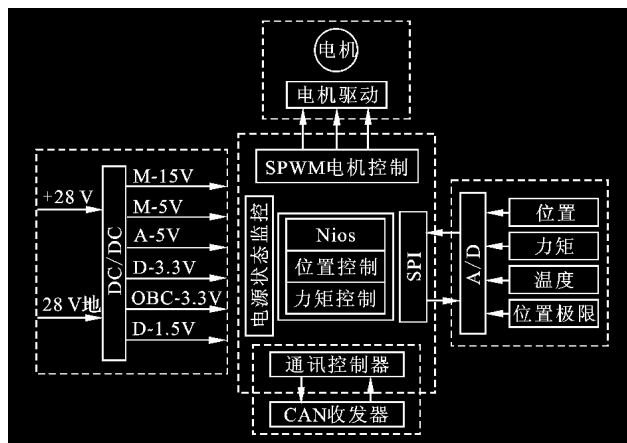


图6 关节控制系统结构

3.1 传感器信号处理模块

传感器信号处理模块主要负责传感器信号的放大、滤波和串行数据 A/D 转换.为了抑制传感器信号的传输噪声,对传感器信号可就近地进行转换并且以数字形式传输.

仪表放大器对位置传感器和力矩传感器信号进行放大、滤波,经过滤波后的传感器信号再经串行



图7 关节的模块电路板

A/D转换器转换,转换结果以外围串行接口 SPI 的形式传输到关节控制器模块。

3.2 关节驱动模块

电机驱动系统如图8所示,其中无刷直流电机采用基于现场可编程门阵列(FPGA)的正弦脉宽调制(SPWM)正弦波的驱动方式,以获得优良的低速特性和力矩特性。为了提高系统的可靠性,当磁编码器失去作用后,可以将数字霍尔传感器作为电机的位置传感器,同时采用方波驱动方式驱动电机运行。在空间应用中,为了防止高能粒子轰击 MOSFET 的门极,造成 MOSFET 的永久损伤,在 MOSFET 的电路中增加了稳压保护功能。

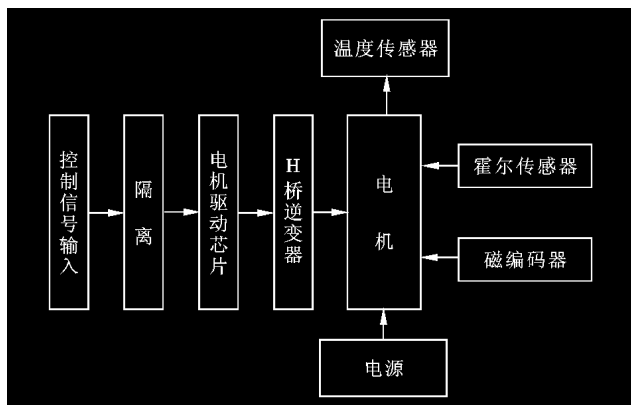


图8 电机驱动系统

3.3 关节控制和通讯模块

模块化关节采用了基于 FPGA 的关节控制方案,因为 FPGA 采用并行处理的方式,所以程序设计更加灵活,I/O 端口更加丰富,并且易于在内部实现全三模冗余结构,具有更强的抗干扰能力,同时 FPGA 也为电机控制设计提供了更快速、性能更高的解决方案。本文的控制方案的主要特点如下。

(1)可在系统中进行无限次重复编程。

(2)部分 FPGA 采用了便于系统集成的积木式结构,其中包括 CPU、存储器(如双口 RAM)和接口逻辑(如外部设备互连 PCD)等多种数字系统。

(3)在 FPGA 的设计中,采用超高速集成电路

硬件描述语言(VHDL)与原理图设计相结合的方式,利用了 Altera 公司提供的库元件,以降低设计的难度。

(4)仿真功能强大,既可采用功能仿真来验证逻辑功能的正确性,也可采用时序仿真来验证时序关系的满足情况。

采用了 Altera 公司提供的内部嵌有 32 b Nios 微处理器的旋风式 FPGA,利用它可设计出两个 FPGA 之间的同步串行接口,其主要功能是交换 FPGA 的工作状态,实现程序数据的传输、比较、主从切换等。与独立硬件电路实现的比较器相比,这种方式更灵活。同步串行接口采用全双工的工作方式,通信接口速率设为 20 kb/s。

3.4 关节电源模块

关节电源模块由 DC/DC 转换电路、线性电源调节电路和门锁处理电路等组成,该模块的组成如图9所示。线性电源具有线性度好、纹波小的优点,缺点是功耗大,而开关电源的效率较高。在空间环境中,由于能量非常有限,所以在电源系统的设计中应采用开关电源和线性电源相结合的方法,即对电源要求较高的场合采用线性电源,要求较低的场合采用开关电源。

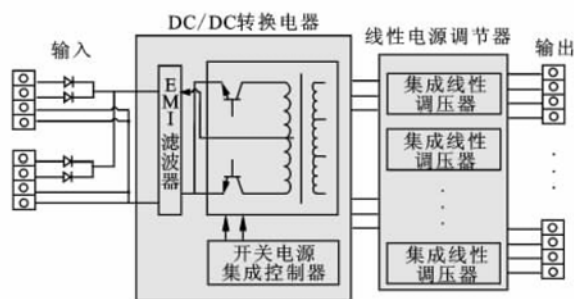


图9 关节电源系统

由于空间机械臂模块化关节的电气系统需要多种电压电源,如 D-3.3V、D-1.5V、A-5V、M-5V、M-15V、OBC-3.3V 等,如果用集成的 DC/DC 转换器,占用空间较大,重量也大,因此本文关节采用多路输出的 DC/DC 转换电路。在 DC/DC 转换电路中,开关电源采用推挽式拓扑结构,与正向激励变化器相比,它的开关电源的正向变换器是单管产生交流,推挽变化器是中间抽头连接,两管推挽工作产生交流。因此,推挽结构的开关电源利用率高、输出电压纹波小。为了降低开关电源系统的电磁干扰,在输入端采用了电磁干扰(EMI)滤波器,在输出端采用了 LC 无源滤波器,采用滤波器的优点是成本低、可靠性高、简单易行。

