

仿人机器人一体化关节微小型伺服控制器的研制^①王宏佳^② 杨 明 贵献国 徐殿国

(哈尔滨工业大学电气工程系 哈尔滨 150001)

摘 要 对仿人机器人一体化关节驱动的技术要求,基于永磁同步电机(PMSM)的矢量控制原理,从电机驱动、电源系统、电流采样和印刷电路板等方面进行了创新性、微小型化设计,研制出了两种可用于机器人关节驱动的微小型高性能伺服控制器,给出了各部分功能模块的设计方法和解决方案。实验结果表明,所设计的伺服控制器的体积、重量满足微小型化要求,而且控制速度、精度高,具有很强的通用性、可扩展性和可移植性,适用于多种机器人控制,对于微小型驱动控制技术的自主创新及产业化具有重要的理论和实践价值。

关键词 一体化关节驱动,微小型伺服控制器,交流伺服系统,永磁同步电机(PMSM),矢量控制

0 引言

仿人和高仿真是机器人发展的主要方向。随着数控技术和机器人技术的发展,仿人机器人各部分功能逐渐完善,性能不断提高,在科研、教育、医疗等领域取得广泛应用^[1-4]。仿人机器人的关节众多,控制结构复杂,其控制性能主要依赖于关节伺服控制器的控制水平^[5-9]。仿人机器人关节伺服系统的微小型化是该领域的一个关键问题。国外在这方面研究较早。美国的 Copley Controls 公司、以色列的 Elmo Motion Control 公司、瑞士的 MAXON motor 公司都已推出适用于该领域的微小型、轻量化伺服系统^[10,11],并已形成系列产品,在仿人机器人领域被大量采用。Copley Controls 公司的 Accelnet 系列伺服控制器采用 Freescale 公司的 DSP56F807 数字信号处理器作为主控芯片。Elmo Motion Control 公司的 Whistle 系列伺服控制器采用与 Accelnet 系列相同的主控芯片,通过优化控制器结构和大量使用 BGA 封装的贴片元器件,能够在更小的体积内实现更高的持续功率输出。国内厂商,如北京和利时、深圳雷赛,也有类似的低压微小型伺服系统^[12],但多数是用于驱动无刷直流电机,不是专门为关节驱动设计,且体积相对较大,功率密度相对较低,不能满足仿人机器人关节驱动场合的要求。

本文针对机器人关节驱动的特殊要求,对伺服

控制器各功能模块进行了小型化设计,综合考虑可靠性、通用性、可扩展性及制造成本,研制开发出了适合于低压直流供电、小体积、高性能、全数字的两种微小型伺服控制器。本文研制的微小型伺服控制器是 863 计划重点项目“仿人机器人高性能单元与系统”要解决的关键技术之一。该项目要实现的“高速高精一体化关节”,其目标就是解决仿人机器人一体化关节驱动所要求的小型、轻量、高速度、高精度、低成本和高可靠性等关键问题^[13-15]。机器人关节的微小型化是整个装置的最主要特征,最终目标是研制具有自主知识产权的新一代仿人机器人一体化关节驱动装置。该伺服控制器的研制为实现机器人关节控制的高速、高精度和微小型化奠定了基础。

1 系统总体结构

机器人关节驱动控制需要对伺服电机进行精确的位置控制,本质上是对转矩进行控制,即对永磁同步电动机(permanent magnet synchronous motor, PMSM)定子电流矢量的相位和幅值进行控制。表贴式 PMSM d-q 坐标系下的电压、磁链、电磁转矩和机械运动方程如下^[16,17]:

$$\begin{cases} u_d = \frac{d\psi_d}{dt} - \omega \cdot \psi_q + R \cdot i_d \\ u_q = \frac{d\psi_q}{dt} + \omega \cdot \psi_d + R \cdot i_q \end{cases} \quad (1)$$

① 863 计划(2008AA042602)资助项目。

② 男,1983 年生,博士;研究方向:机器人控制,交流伺服系统,电力电子与电力传动;联系人,E-mail: edward789789@yahoo.com.cn (收稿日期:2010-10-08)

$$\begin{cases} \psi_d = L \cdot i_d + L_m \cdot i_f \\ \psi_f = L \cdot i_f \end{cases} \quad (2)$$

$$T_e = p \cdot \psi_f \cdot i_n \quad (3)$$

$$J \cdot \frac{d\Omega}{dt} = T_s - T_i - B \cdot \Omega \quad (4)$$

式中, $u_d, u_q, i_d, i_q, \Psi_d, \Psi_q$ 为 d-q 坐标系下定子电压、电流和磁链分量, R, L 为定子相电阻和相电感, ω, Ω 为电角速度和机械角速度, T_e, T_l 为电磁转矩和负载转矩, p 为极对数, Ψ_f 为永磁体磁链, J 为转动惯量, B 为阻力系数。

对表贴式 PMSM, 采用 $i_d = 0$ 控制, 定子电流形成的空间磁势与永磁体励磁磁场正交, 电流控制效率高, 可实现最大转矩/电流控制^[18]。

图1为PMSM矢量控制系统结构图。此系统是由伺服电动机、位置传感器、电流传感器、功率器件和伺服控制器组成的闭环控制系统。

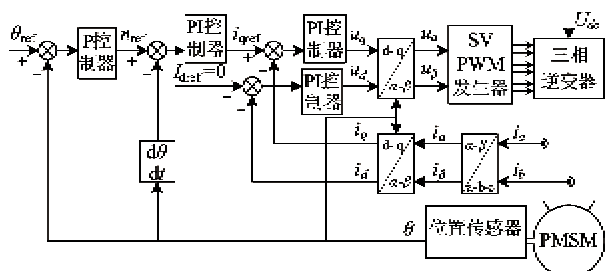


图1 PMSM 矢量控制系统结构图

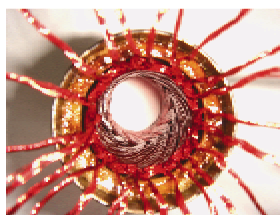
伺服电动机是交流伺服系统的主体部件,高功率密度电机采用高磁能积的稀土钕铁硼磁体以及高导磁率的铁磁材料有效提高电机的出力,缩小电机体积,提高功率密度比。高速永磁伺服电机对电机的结构及工艺要求有别于普通永磁电机,对涡流、铁损等方面的磁场和热场的分析是必要的。设计时需采用电机多场耦合数字模拟仿真分析计算技术,综合考虑电机的出力和发热。

电机定子绕组三相供电,额定线电压为 48V,对电机的结构尺寸进行优化设计。为了提高电机的动态响应,电机定子采用无槽结构,降低电机电感。为减小电机的力矩波动,采用表面凸出式的磁路结构,并采用 Halbach 永磁阵列,转子无铁心且能有效增加气隙磁密。转子外部加不锈钢套,增加转子强度,采用应力场分析优化不锈钢套和磁钢的过盈量,使磁钢受一定的压应力,抑制电机转子高速运转的离心力。轴选用不锈钢材料。电机的绕组采用菱形绕组结构,用绕组编织机在模具上编织出平面绕组,利用工装卷为筒型,再用树脂固化。轴承在关节传动

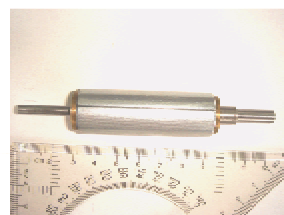
中起着至关重要的作用。轴承选用薄壁轴承 Kaydon 超薄系列。此类轴承质量很小,可以减轻关节的质量。图 2 为研制的无槽电机实物图。



(a) 无增电机



位定于



(c) 转子

图2 无槽电机实物图

电机伺服控制器接收到来自位置传感器的信号后,得到电机转子的具体位置,再结合外部接口的输入指令,通过运行控制算法生成具体的控制电压和电流,从而驱动伺服电机旋转,完成规定的动作。整个系统要求实时性高,响应速度快,这需要高速高性能的控制芯片,以实现较高的开关频率,缩短控制周期,还要同步完成对上位机的通讯,接受指令和发送状态。伺服控制器要具有较高的过载能力,这要求驱动模块部分要留有足够的冗余。电机编码器信号的传输要求高速、抗干扰能力强。图3所示为驱动系统结构框图。

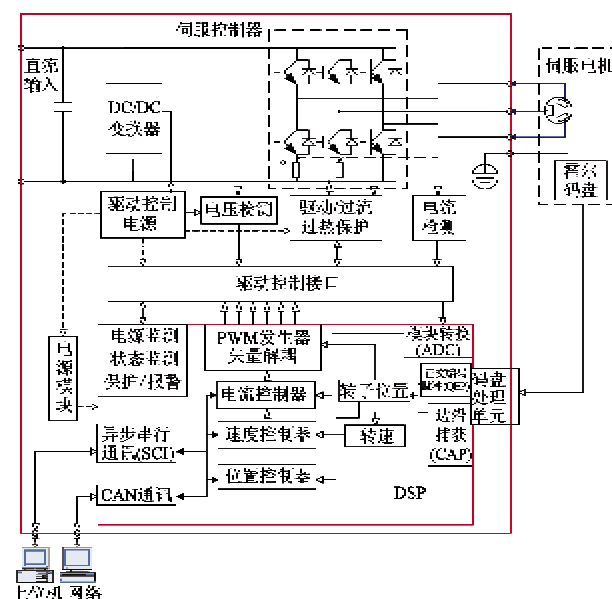


图3 伺服控制器系统结构图

从可靠性和精度两方面综合考虑,采用冗余设计方案,位置传感器采用数字式霍尔和磁编码器作为电机位置传感器,改善传感器的位置信息处理与识别技术,有效提高传感器分辨率及系统抗振性等。

2 控制器功能模块设计

下面分别介绍微小型伺服控制器各部分功能模块的设计方法及解决方案,主要包括数字信号处理器(DSP)控制核心、功率逆变桥、驱动电路、电流采样、电源系统、位置检测、CAN 总线接口、RS232 通讯接口以及 PCB 布局布线设计等。

控制核心 DSP 的选择: DSP 最小系统的运算速度以及资源是否合理够用对整个控制系统起着决定性的作用。本文选用 TI 公司 280x 系列 DSP,既具有高速运算和信号处理能力,又具有强大的事件管理能力和嵌入式控制功能,同时片内集成了丰富的外设,可提供 ePWM 模块、A/D 采样、异步串行通讯(SCI)、正交编码脉冲电路(eQEP)、边沿捕获(eCAP)和 eCAN 总线等硬件资源。

驱动方式: 伺服电机为永磁无刷电机,驱动方式可以选择方波驱动或正弦波驱动两种方式。驱动方式可以在编写软件中通过修改程序设置而方便地切换。

控制周期的选择: 为提高系统的动态响应, PWM 开关频率设定在 15 kHz,速度及位置环的采样频率为 1.5 kHz。PWM 周期中断主要实现转子位置角检测,并根据电流调节器输出产生 SVPWM 信号。每 10 个 PWM 周期执行 1 次速度环中断处理程序,计算速度调节器输出作为电流调节器给定。

位置环采用比例控制。 电流环、速度环控制采用具有饱和限幅及 Anti-windup 的 PI 算法,该控制策略能使控制器快速退饱和,加快控制系统响应速度且减小超调,控制框图如图 4 所示。

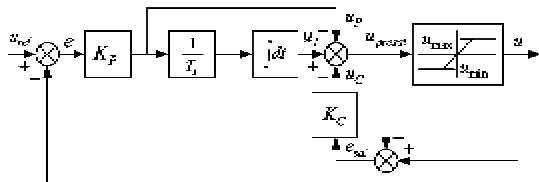
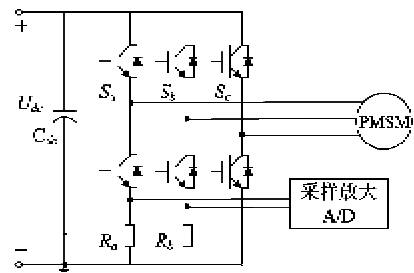


图 4 具有饱和限幅及饱和校正的 PI 控制框图

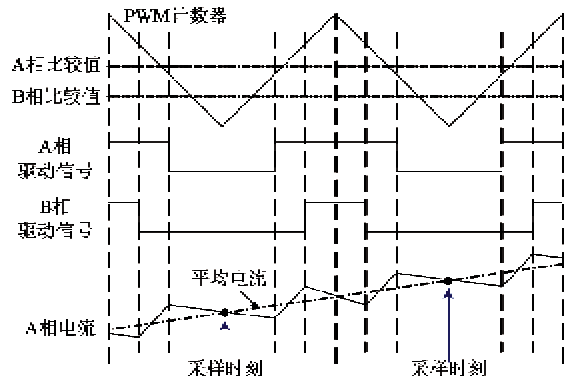
逆变桥及其驱动单元: 三相逆变桥采用分立元件搭建,功率 MOSFET 可选用 IR 或 Fairchild 等公司器件,满足驱动系统设计输出指标,并留有一定的裕量。功率管驱动电路的设计可选用 IR 公司的半桥

驱动芯片,兼容 3.3V 逻辑脉冲输入。针对机器人关节体积的限制条件,重点考虑选用器件的封装形式及散热条件。驱动单元的供电可以选择 4 路独立电源或者使用 1 路电源加自举电容来实现。脉冲指令与主回路不需要隔离。

电压电流检测: 实时监控直流输入电压,判断是否出现欠压/过压并作出警报。通过在桥臂上串联采样电阻的方式检测电机相电流,根据采样到的两相电流经调理电路后输入到 DSP 芯片的 A/D 模块,在程序中计算可得电机三相电流,这就避免了采用霍尔传感器等体积较大、成本较高的检测元件。图 5 为双电阻电流采样电路及采样时刻原理图。



(a) 双电阻电流采样电路



(b) 电流采样时刻

图 5 双电阻采样原理

电源系统: 伺服控制器系统内部的电源系统是系统可靠稳定工作的能源保证,电源的设计对控制器至关重要。考虑驱动器对 15V、5V、3.3V 和 1.8V 电源的具体需要,可以按照如下两种结构设计电源系统:多路输出隔离式和降压级联式。多路输出隔离式结构采用反激变换器电路拓扑,应用磁集成技术设计平面变压器并使用 PCB 安装,可以获得多路隔离的电压输出。降压级联式结构采用 DC/DC 降压转换器,把直流输入电压进行逐级降压处理,得到各路输出电压。图 6 为 2 种电源系统结构框图。

位置检测: 伺服电机设计带有位置霍尔器件,并配有并行增量式码盘。霍尔输出 U/V/W 换相信号,

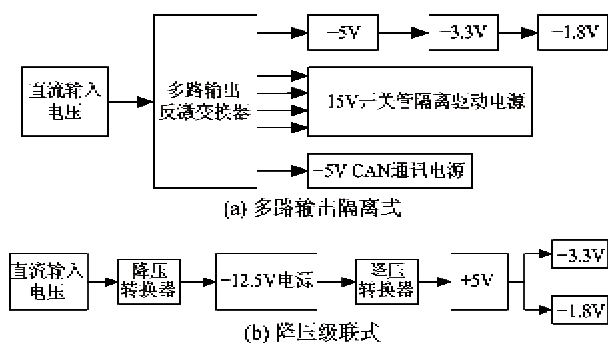


图6 电源系统结构框图

满足电机方波驱动要求;应用增量式码盘提高测速精度,并结合霍尔信号启动进行正弦波驱动模式。

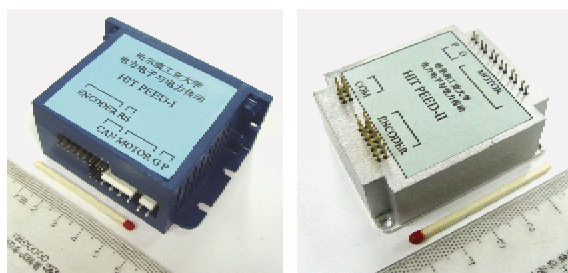
通讯接口:带有 RS232 总线,可以进行单机调试,更新升级驱动程序。CAN 总线构成驱动网络,用于仿人机器人的联机协调动作。

PCB 布局布线:综合考虑印制板尺寸、EMC、散热、成本等约束条件,采用多层板(4层、6层和8层)设计,叠层安排要要考虑信号完整性和 RF 能量的抑制。对于散热要求较高的逆变桥部分可以设计成铝基板或者采用 PCB 导热外接机壳散热设计。

3 实验研究

根据机器人关节驱动的具体要求,研制开发出 HITPEED-I 型和 HITPEED-II 型两种结构的微小型伺服控制器,以面向不同的结构设计要求。图7为控制器实物照片。图8为各功能分布。

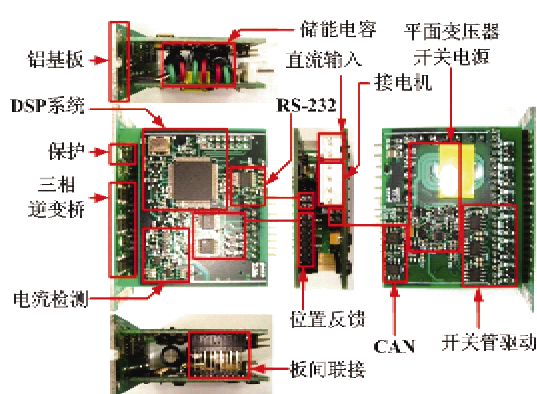
本次研发的微小型伺服控制器机械尺寸(长(宽(高) $\leq 60\text{mm}$ (50mm (30mm ,重量 $\leq 90\text{ g}$,直流工作电压 $10\sim 60\text{ V}$,输出功率为 150 W ,持续电流 7.5 A ,峰值电流 15 A ,工作温度 $-15\sim +70^\circ\text{C}$,通讯接口采用 CAN 总线,整体性能指标达到国际先进水平,能够实现永磁同步电机的电流、转速、位置闭环控制,软件编写的计算机图形化界面可进行参数调整和运动控制。



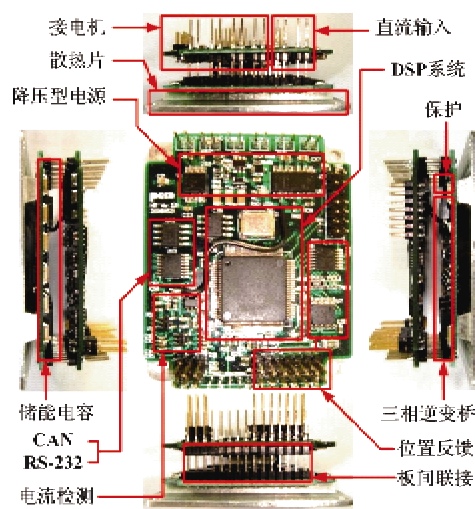
(a) HITPEED-I型

(b) HITPEED-II型

图7 微小型伺服控制器



(a) HITPEED-I型



(b) HITPEED-II型

图8 伺服控制器各功能分布

通过人机界面可方便地观察实验结果,图9为正反 10000 r/min 速度响应实验曲线,具有过渡时间短,超调量小的特点。图10为位置脉冲响应曲线,可以实现电机的快速跟踪定位。

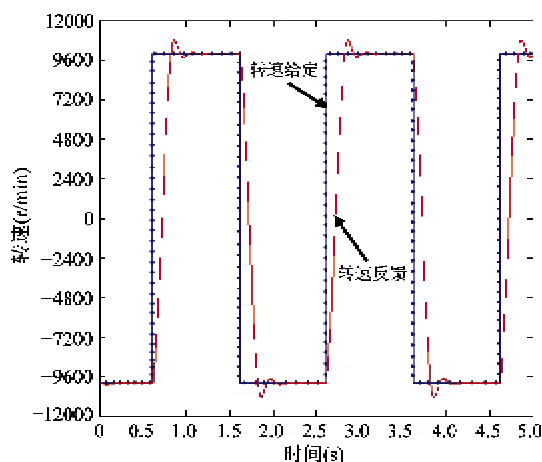


图9 速度响应曲线

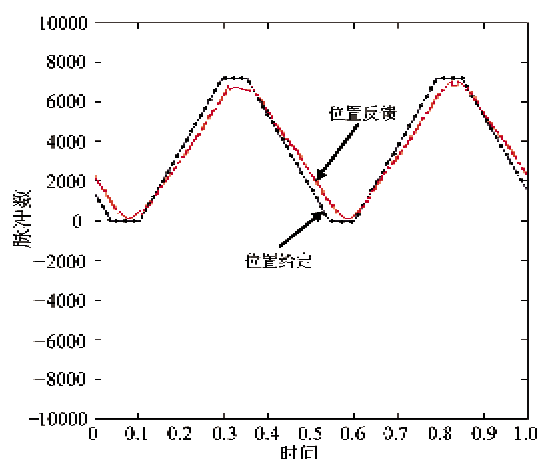


图 10 位置脉冲响应曲线

4 结 论

机器人一体化关节的微小型化是仿人机器人研究所要解决的关键问题。本文基于机器人关节驱动控制器的微小型化设计思想,研制开发的 2 种型号的伺服控制器既具备体积小、重量轻的特点,又能够实现伺服电机的高速、高精度控制。采用 DSP 控制核心保证了算法的有效执行及升级扩展,使用 C 语言开发代码,便于移植到其他相似的控制系统中。作为仿人机器人驱动控制所需要的关键部件,微小型伺服控制器的研究开发对于提高我国在该领域的自主创新能力,增强对外竞争力具有重要的理论价值和实践意义。

参考文献

- [1] 谢涛,徐建峰,张永学等. 仿人机器人的研究历史、现状及展望. 机器人, 2002, 24(4): 367-374
- [2] 于秀丽,魏世民,廖启征. 仿人机器人发展及其技术探索. 机械工程学报, 2009, 45(3): 71-75
- [3] Kanda T, Ishiguro H, Imai M, et al. Development and evaluation of interactive humanoid robots. *Proceedings of the IEEE*, 2004, 92(11): 1839-1850

- [4] Garcia E, Jimenez M A, De Santos P G, et al. The evolution of robotics research. *IEEE Robotics & Automation Magazine*, 2007, 14(1): 90-103
- [5] Pahon L, Martinez C P, Villagra J, et al. Mechatronic design and control of a critical biped robot joint. In: *Proceedings of IEEE International Conference on Mechatronics*, Malaga, Spain, 2007. 1-6
- [6] Tsuji T, Ohtsishi K, Sabanovic A. A controller design method based on functionality. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2007, 54(6): 3335-3343
- [7] An-Ping W, Pau-Lo H. The modular design of the distributed edutainment biped humanoid robot system. In: *Proceedings of IEEE Workshop on Advanced Robotics and Its Social Impacts*, Hsinchu, China, 2007. 1-6
- [8] Bentivegna D C, Atkeson C G, Jung-Yup K. Compliant control of a hydraulic humanoid joint. In: *Proceedings of IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots*, Pittsburgh, USA, 2007. 483-489
- [9] Kab-Il K, Son Y I, Kim P B S. Construction of small humanoids with a new joint actuator module. In: *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, New Orleans, USA, 2004. 4510-4514
- [10] 喻刚,舒志兵. 基于 CAN 总线的 ELMO 伺服运动控制系统. 机床与液压, 2008, 36(7): 302-305
- [11] 吴明阳,孟庆鑫,王沐楠. 电机驱动型两栖仿生机器蟹步行腿研究. 电机与控制学报, 2005, 9(4): 307-310, 315
- [12] 黄伟忠,宋春华. 永磁交流伺服电机国内外市场概况. 微特电机, 2009, 37(1): 59-62
- [13] 周玉林,高峰. 仿人机器人构型. 机械工程学报, 2006, 42(11): 66-74
- [14] 李开生,张慧慧,费仁元等. 机器人控制器体系结构研究的现状和发展. 机器人, 2000, 22(3): 235-240
- [15] Granosik G, Borenstein J. Integrated joint actuator for serpentine robots. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2005, 10(5): 473-481
- [16] Pillay P, Krishnan R. Modeling, simulation, and analysis of permanent-magnet motor drives, Part I: The permanent-magnet synchronous motor drive. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 1989, 25(2): 265-273
- [17] Jahns T M. Motion control with permanent-magnet AC machines. *Proceedings of the IEEE*, 1994, 82(8): 1241-1252
- [18] 唐任远等. 现代永磁电机理论与设计. 北京:机械工业出版社, 1997. 252-258

Development of minitype servo controllers for humanoid robot integrated joint systems

Wang Hongjia, Yang Ming, Gui Xianguo, Xu Dianguo

(Department of Electrical Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001)

Abstract

According to the requirements for humanoid robots' integrated joint drive, two types of high performance minitype servo controllers for robot joint drive were developed based on the permanent magnet synchronous motor (PMSM) vector control theory and the innovative and miniature design in motor drive, power supply, current sampling, printed circuit board fabrication and other aspects, and the design methods and the implementing techniques of their function modules were given. The servo controllers have the features of small size, light weight, and good control performance, and are applicable for various robot controls because of their strong universality, scalability and portability. The study is of great theoretical and practical importance to independent innovation and industrialization of minitype servo control technologies.

Key words: integrated joint drive, minitype servo controller, AC servo system, permanent magnet synchronous motor (PMSM), vector control