

基于 DSP 和模糊 PD 控制的智能人工腿位置伺服控制系统

谭冠政¹, 陈勇旗¹, 王越超²

(1. 中南大学 信息科学与工程学院, 湖南 长沙 410083;
2. 中国科学院 机器人学开放研究实验室, 辽宁 沈阳 110015)

摘要: 智能人工腿最显著的特点是能模仿人体健康腿的运动方式且步行速度可自然、随意地跟随截肢者步行速度的变化而变化。对其进行研究对改善残疾人的生存条件和促进医疗事业的发展具有重要的现实意义。以前研制的智能人工腿, 其汽缸内针阀开度的控制都是采用步进电机所构成的开环系统, 位置精度不高, 为此, 作者针对智能人工腿的控制原理和 TMS320F240 数字信号处理器的主要特点, 设计了 1 种基于 TMS320F240 的直流电机模糊位置伺服控制系统的结构, 并对该位置伺服系统进行了计算机仿真。实验结果表明, 所设计的伺服控制系统具有智能性、鲁棒性、快速性和准确性, 可以有效地用于智能人工腿的行走控制。

关键词: 智能人工腿; 数字信号处理器; 位置伺服控制系统; 模糊控制策略

中图分类号: TP242.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1005-9792(2001)04-0417-05

智能人工腿的设计融合了智能控制、计算机应用、机械设计与制造、新材料、生物医学工程以及康复医学工程等技术, 它主要由膝关节、小腿及脚组成。其中, 最关键的部分是膝关节。在智能人工腿的膝关节内装有步速传感器, 尾部带有小型直流电机的空压气缸、微处理器以及电池等。步速传感器用于实时检测步行速度; 汽缸是控制膝关节屈伸运动的执行机构, 其尾部的电机控制汽缸内 1 个针阀(流量控制阀)的开度, 通过改变阀门开度可以改变膝关节弯曲和伸展的速度, 进而达到改变人工腿步速的目的; 微处理器主要根据步速的测定值, 控制电机的运动以改变针阀的开度, 达到使人工腿步速与另一侧健康腿相匹配的目的。整个系统采用小型锂电池供电, 电池寿命因使用者的步行量、步速变化的频率不同有所差异, 一般为 1 a 左右^[1,2]。

目前, 处于先进水平的 3 种智能人工腿产品 IP, IP+ 和 NFC111, 其汽缸内针阀的开度控制都是采用步进电机所构成的开环系统, 位置精度不高^[1-4]。为此, 作者设计了 1 个具有位置和速度反馈的闭环控制系统, 并引入模糊 PD 控制策略, 以提高控制系统的智能性、鲁棒性、快速性和准确性。为了达到这个

目的, 采用直流电机。因为直流电机具有功率密度大、体积小、伺服性能好等特点^[5]。另一方面, 在控制器结构设计中选择以数字信号处理器(Digital Signal Processor, DSP)为中心的程控控制方式。

1 直流电机位置伺服控制系统的建模

1.1 电机的数学模型

在智能人工腿中, 由于汽缸内的针阀体积非常小, 其针杆运动的行程非常短, 对传感器的设计、安装以及反馈信号获取带来很大困难, 所以, 要对针杆的运动进行位置和速度反馈也很难。为此, 这里只对电机的转角和转速进行反馈(利用电机尾部的混合式光电编码盘)。由于在电机和针阀的针杆之间有减速器以及将旋转运动转变为直线运动的转换机构, 并且减速器和转换机构存在着固定的、可测量出的传动误差, 所以, 在设计控制系统时, 一方面仍将针阀开度给定值作为整个控制系统的输入信号, 另一方面采用软件方式将针阀开度给定值转换成对应的电机转角给定值并进行误差补偿, 然后将这个经过

误差补偿的电机转角给定值作为电机位置伺服控制系统的输入信号,与电机的位置和速度反馈信号一起构成对电机进行位置环和速度环的闭环控制.由于减速器和转换机构的传动误差可以精确测量出来,所以,采用这种方式完全可以实现对针阀开度的精确控制.具体来说,在电机位置伺服系统中,混合式光电编码盘和 TMS320F240 数字信号处理器用于获取实际的电机转角和实际电机转速作为反馈信号,并在数字信号处理器中将实际的电机转角与给定的电机转角进行比较,获得其偏差 e ,在通过位置环的 PD 调节后,输出速度指令信号,然后将此速度信号与电机实际转速反馈信号进行比较并再次进行 PI 调节.这样,经过位置外环和速度内环 2 个调节器的校正,输出 PWM 控制信号去驱动电机,以实现智能人工腿的位置伺服控制.直流电机模型可用下面的方程组来描述.

a. 电枢回路电压方程式:

$$V_i(s) - V_g(s) = (R_a + sL_a)I_a(s). \quad (1)$$

b. 电枢回路感应电压方程式:

$$V_g(s) = K_e \Omega(s). \quad (2)$$

c. 电机转矩方程式:

$$T_g(s) = K_t I_a(s). \quad (3)$$

d. 负载方程式:

$$T_g(s) - T_f(s) - T_L(s) = (B + sJ) \Omega(s). \quad (4)$$

综合上述方程式,可得到直流电机的数学模型,即电压—位置传递函数为

$$G(s) = K_t / [s(R_a B(1 + t_e s)(1 + t_m s) + K K_e)]. \quad (5)$$

其中: $t_m = J/B$; $t_e = L_a/R_a$; V_i 为输入电枢电压; V_g 为反电动势; K_e 为反电势系数; K_t 为转矩系数; T_g 为电机转矩; T_f 为克服摩擦所需转矩; T_L 为负载转矩; J 为折算到电机轴上的总转动惯量; B 为粘滞摩擦因数; Ω 为电机转速.将电机参数代入,式(5)变为

$$G(s) = 1.79 \times 4762 / [s(s^2 + 510s + 4762)]. \quad (6)$$

1.2 位置环和速度环 PID 控制器参数的确定

利用 Matlab 对没有 PID 控制器的电机位置伺服系统进行仿真.仿真结果表明系统的调节时间 t_s 接近 5 s,无法满足控制的实时性要求,因此,必须加上 PID 调节器. PID 的形式为

$$G(s) = K_P + K_I s + K_D / s.$$

为了达到智能人工腿的要求,利用位置系统的

经典设计方法,即在位置外环上添加 1 个 PD 调节器以减少调节时间,而在速度内环中添加 1 个 PI 调节器以消除静态误差. K_P , K_I , K_D 值的大小通过经典的 Ziegler-Nichels 方法得到,即先令 $K_I = 0$, $K_D = 0$,增大系统的比例系数,直到系统刚好产生振荡时得到系统的增益为 K_m ,由 Z-N 方法可得本系统 PID 控制器的 3 个参数为

$$K_P = 0.6k_m, K_I = K_P \omega / \pi, K_D = K_P T / (4 \omega).$$

其中, ω 为系统刚产生振荡时的震荡频率.上述 Z-N 方法的实现以及具体数值的运算都通过 Matlab 的 M 文件编程得出,并且通过 Simulink 软件对从程序中得出的控制参数值进行实时调整,最终得到电机位置伺服系统的位置环和速度环的控制参数,其结果如下:位置环比例系数 K_P 为 50,微分系数 K_D 为 1.02,速度环比例系数 K_P 为 0.5,积分系数 K_I 为 1.56.

2 控制策略的改进

对电机位置伺服系统采用位置环和速度环双闭环控制,其中速度环采用 PI 调节,位置环采用 PD 调节.由于常规 PD 调节器不具有在线调整其参数 K_P 和 K_D 的功能,致使其在不同的偏差,系统不能满足对 PD 参数的自整定要求,从而影响其控制效果的进一步提高.而利用模糊 PD^[68] 对系统进行调节,则可以在实时控制中不断优化 PD 调节器参数,从而使位置伺服系统具有更好的性能指标.

2.1 位置环的模糊 PD 调节

位置环 PD 调节的比例系数 K_P 对整个位置伺服系统影响非常大,因而,在本系统中位置环的模糊控制器将对 K_P 进行模糊化.模糊控制器的输入量为:从光电编码盘获取的电机实际位置和设定位置的偏差 e ,偏差的变化率 e_c .利用 e 和 e_c 在线调整位置环 PD 调节器的比例系数 K_P .

2.2 输出速度信号的计算与输出

在模糊控制器的设计过程中,由位置偏差 e 和偏差变化率 e_c 的模糊集确定各变量的论域,建立模糊变量赋值表,然后根据控制经验归纳若干条控制规则,再由控制规则进行模糊推理.对于输出清晰化处理,采用最大隶属度原则得到 1 张控制查询表,最后将此查询表存入 TMS320F240 的 FLASH EEPROM 中.在实时控制中,根据位置偏差 e 和偏差变化 e_c

值,通过TMS320F240的查表指令TBLR可迅速获取位置PD调节的比例系数 K_P 。这种查表方法非常适合于智能人工腿的快速性要求。在智能人工腿模糊控制器的具体设计过程中,把位置偏差 e ,偏差变化率 e_c 和比例系数 K_P 分别分为14,7,13个等级。且偏差 e ,偏差变化率 e_c 和比例系数 K_P 均服从正态分布。于是,可以得出三者隶属度的主观定义值。对于连续变化的量 e, e_c ,若不是整数,则可以把它归入最接近的整数。例如,5.8归入6,3.2归入3,-1.4归入-1等。最后根据 e, e_c, K_P 的隶属度以及相应的模糊控制算法,利用Visual Basic语言离线方式得到1张模糊控制查询表,其结果如表1所示。

表1 模糊控制参数 K_P 查询表

E/E_c	-3	-2	-1	0	1	2	3
-6	6	6	6	6	4	4	3
-5	6	6	6	6	4	4	3
-4	6	6	4	4	4	3	0
-3	6	6	4	4	4	3	0
-2	4	4	3	3	0	0	0
-1	4	4	3	3	0	0	0
-0	3	3	3	0	0	0	-2
0	3	0	0	0	-2	-2	-2
1	0	0	0	-2	-2	-4	-4
2	0	0	0	-2	-2	-4	-4
3	0	-2	-4	-4	-4	-6	-6
4	0	-2	-4	-4	-4	-6	-6
5	-2	-4	-4	-6	-6	-6	-6
6	-2	-4	-4	-6	-6	-6	-6

3 基于TMS320F240的直流电机位置伺服系统的硬件结构设计

直流电动机伺服系统通常由电机本体、速度与位置传感器、驱动及伺服控制电路3个部分构成。在智能人工腿的研究过程中,采用微型直流电机。其速度和位置传感器可以采用混合式光电编码盘,它同时提供了精确的电机位移和速度反馈信号。功率驱

动电路将由基极驱动电路、保护电路、桥式(H型)功率转换电路组成。控制电路以DSP为中心,并以程序控制的全数字方式实现电机控制,生成精确的PWM控制波形。图1为智能人工腿位置伺服系统的结构框图。

3.1 位置和速度的检测

光电编码盘输出的光电脉冲通过TMS320F240的正交编码脉冲捕获单元QEP电路^[3]送入TMS320F240,以产生位置和速度反馈信号。由TMS320F240的性能可知,正交编码脉冲(QEP)捕获单元可以直接处理编码盘的2路正交输出信号,它对输入的2路正交信号的上升和下降进行捕获,根据2路信号的相位关系自动判断电机的正/反转,并据此对捕获信号进行加/减记数,在用户程序中可以方便地读取当前的记数值和记数方向,即电机的转角和转向,而电机的速度可以根据记数脉冲的频率获得。解码脉冲、增/减记数方向以及时钟图如图2所示。

3.2 功率器件的驱动

在智能人工腿的设计中,其位置伺服控制系统的电机驱动装置采用了双极性桥式驱动电路。由于近年来出现了集成化的双极性驱动芯片,而且它能方便而廉价地应用于对效率和体积要求较高的产品中,非常适合智能人工腿的微型电机驱动,因此,最终选用L298双H桥驱动器集成芯片。这种芯片可以直接接受PWM电平信号,因而非常适合于TMS320F240的直接PWM输出控制。

3.3 保护环节

在智能人工腿位置伺服系统的设计中,采用完善的保护环节。该环节可分为功率器件的保护、过电流保护、直流回路欠电压保护。各保护动作信号通过光电隔离送往TMS320F240的PDPINT引脚。当PDPINT引脚拉至低电平时,TMS320F240内部立即停止记数,所有PWM输出呈现高阻状态,同时产生中断

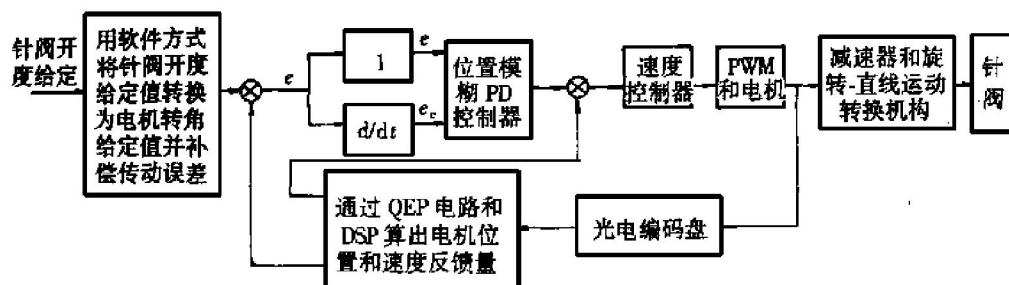


图1 智能人工腿位置伺服系统结构框图

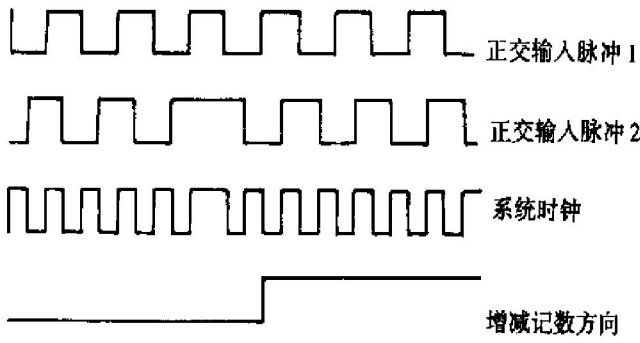


图 2 正交解码脉冲和编码定时器时钟及方向

信号通知 TMS320F240 有异常情况发生, TMS320F240 进行相应的处理, 例如报警、复位等. 这样, 系统的整体可靠性提高.

4 软件设计

在智能人工腿的控制系统中, 位置模糊 PD 调节器和速度 PI 调节器都用软件方式实现, 因而软件设计是智能人工腿研究的重要环节. 从伺服系统的结构看, 软件包括主程序和位置环、速度环、故障处理 3 个中断处理子程序.

4.1 主程序

它包括对整个系统进行初始化, 协调所有子程序以及控制电机的启动、运行和制动 3 个部分.

4.2 位置环调节中断子程序

这个程序每 6 ms 调用 1 次, 中断级别高于速度环程序; 位置环程序的作用主要是实现模糊 PD 调节器的功能. 具体地说, 此中断子程序首先根据电机转角期望值和实际值计算出两者的偏差及偏差的变化率, 并将此偏差和偏差的变化率模糊化, 然后, 依据这 2 个值查模糊控制查询表, 得到比例系数 K_P , 再将 K_P 进行清晰化计算, 就可以进行位置环的常规 PD 调节, 输出速度指令信号至速度环调节子程序.

4.3 速度环调节子程序

速度环程序每 1 ms 调用 1 次, 它将位置环得到的速度指令信号 V_g 与从光电编码盘得到的速度反馈信号 V_f 进行比较, 相减后得到两者偏差, 再进行常规 PI 调节. 最终输出 PWM 信号驱动电机. 整个主程序的框图如图 3 所示, 其中伺服系统位置模糊 PD 子程序框图如图 4 所示.

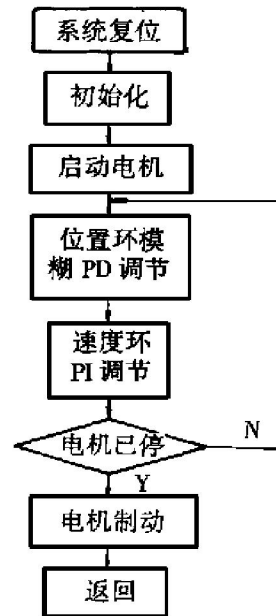


图 3 位置伺服系统主程序框图

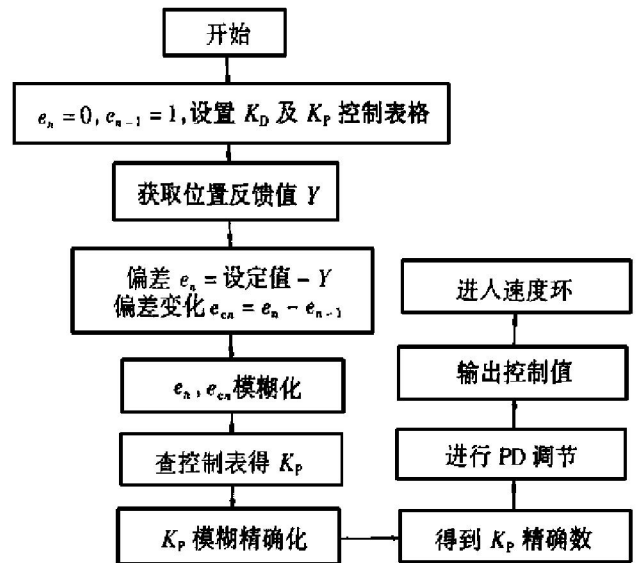


图 4 伺服系统位置模糊 PD 程序框图

5 仿真结果及分析

对直流电机位置伺服控制系统进行计算机仿真, 单位阶跃时的响应波形如图 5 所示.

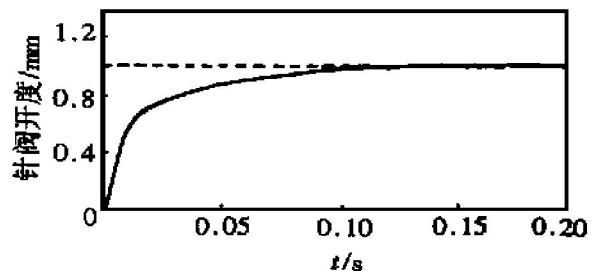


图 5 位置响应波形

从此波形可求得系统的调节时间 $t_b \approx 0.05$ s, 静态误差 $e_{ssr} = 0$, 因而系统具有良好的动态、静态性

能,可以实现快速、精确的定位,完全满足控制智能人工腿的运动要求.

6 结 论

a. TMS320F240 DSP 是 1 种非常适合智能人工腿运动控制的数字信号处理器,利用它可实现全数字直流电机位置伺服系统,提高了伺服系统的精度及运行速度.

b. 由于常规 PD 调节器不具有在线调整其参数 K_P , K_D 的功能,致使其不能满足在不同的偏差和偏差变化下系统对 PD 参数的自整定要求,从而影响其控制效果.而利用模糊 PD 对系统进行调节,则可以在实时控制中不断优化 PD 调节器参数,从而可使位置伺服系统具有更好的性能指标.

c. 智能人工腿闭环位置控制系统具有很好的智能性、鲁棒性、快速性和准确性,可有效地用于智

能人工腿的行走控制.

参考文献:

- [1] 高桥一史. ブラツチフオード, エンドライト义足の最近の动向について[J]. 日本义肢装具学会志, 1997, 13(1): 34-42.
- [2] Datta D, Howitt J. Conventional versus microchip controlled pneumatic swing phase control for transfemoral amputees: User's verdict [J]. *Prosthetics and Orthotics International*, 1998, 22: 129-135.
- [3] 玉义弘. インテリジエント义足膝継手の紹介[J]. 日本义肢装具学会志, 1997, 13(1): 14-19.
- [4] 谭冠政, 吴立明. 国内外人工腿(假肢)研究的进展及发展趋势[J]. *机器人*, 2001, 23(1): 91-96.
- [5] 李仁定. 电机的微机控制[M]. 北京: 机械工业出版社, 1999.
- [6] 徐子文. 数字信号处理数据手册[R]. 武汉: 武汉力源电子股份有限公司, 1998.
- [7] Texas Instruments Corporation. TMS320F240 DSP Controllers Reference Set (Peripheral Library and Specific Drive) [R]. Texas Instruments Corporation, 1997.
- [8] 王学慧. 模糊控制理论及研究[M]. 北京: 电子工业出版社, 1987.

Servo control system for intelligent artificial legs based on DSP chip and fuzzy PD control strategy

TAN Guan-zheng¹, CHEN Yong-qi¹, WANG Yue-chao²

(1. College of Information Science and Engineering, Central South University, Changsha 410083, China;

2. Robotics Laboratory, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110015, China)

Abstract: Intelligent artificial leg has been an interesting research project in the fields of robotics and biomedical engineering. It has the following excellent characteristics. It can imitate the movement ways of human healthy legs and its walking speed can change naturally with the change of the disables' walking speed. The research on this project is of practical significance to improve the living situation and benefit the disabled. In the past years, several intelligent artificial legs have been developed, such as IP, IP+ and NF-C111. But the controller used for regulating the turn-down ratio of needle-plug valve in these legs is an open loop system with a stepping motor, so it has lower position precision. In this paper, we will design a closed-loop control system with position and speed feedback and adopt fuzzy PD control strategy so as to improve the intelligent behavior, robustness, response speed, and accuracy of this control system. First, we give introductions to the control principle of intelligent artificial legs and main characteristics of TMS320F240 digital signal processor, and then propose a system structure for the D.C motor position servo control of intelligent artificial legs based on fuzzy logic and TMS320F240. The result of computer simulation for this control system indicates that the design method proposed here is correct and can be used effectively to control the walking movements of intelligent artificial legs.

Key words: intelligent artificial leg; digital signal processor; position servo system; fuzzy control strategy