

直流电机位置伺服系统设计

宋洋,叶秀芬

(哈尔滨工程大学, 哈尔滨 150001)

摘要:以机械臂的驱动电机为研究对象,采用廉价的旋转电位器作为位置传感器,设计了基于单片机的直流电机位置闭环控制系统。首先,研究了直流电机的位置控制原理和实现方法,并提出了适用于该系统的力矩控制方式。然后,从设计指标出发,计算了电机的负载,选择了执行电机,并设计了系统的硬件电路和相应的控制程序。最后,重点对系统调试过程中出现的非线性问题进行了研究,针对机械产生的非线性问题提出了改进方案和补偿的方法,并应用到了系统实际设计中。成功实现了直流电动机在空载、负载这两种不同状态下的位置控制。

关键词:直流电机;位置控制;负载;空载;非线性

中图分类号: TM921.54⁺1 **文献标志码:** B **文章编号:** 1000-0682(2009)02-0067-04

The design of direct current motor place servo system

SONG Yang, YE Xiufen

(Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

Abstract: This paper has taken the driving motor of mechanical arm as the object of study and has also designed a closed-loop position control system for DC torque motor, which uses the analog revolving potentiometer as the position detector. Firstly, this paper has studied the principle of position control and how to realize torque control. Furthermore, a suitable control method for this special system is presented. Based on the design indexes and the torque of an appointed load, this paper has selected a DC torque motor and the corresponding mechanical part. And design the hardware and software of the system. In addition, this paper has conducted the research about the non-linear problems which appeared to this system. Aiming at these non-linear problems, which severely affect the control accuracy, the improvement program and the compensation method have been proposed. This system has successfully realized the loaded and idle control of DC motor.

Key words: direct current motor; position control; load; idling; non-linear factors

0 引言

伺服系统是自动控制系统中的一类,随着微电子技术和计算机技术的飞速发展,它的应用几乎遍及社会的各个领域,如:机械手臂、雷达天线自动瞄准,电气机车自动调速,磁盘驱动系统等。该文以机械臂的位置伺服系统为研究对象,一般机械臂用直流电机进行驱动,旋转变压器作为位置检测件。由于旋转变压器价格高且还需专用的电源,该文采用较廉价的旋转电位器作为位置传感器设计了一机械臂位置控制系统。

收稿日期: 2008-11-24

作者简介: 宋洋(1979),女,助教,硕士研究生,研究方向为控制理论与控制工程。

1 系统总体设计

1.1 位置控制原理

直流电动机的机械特性方程如式(1)所示。根据式(1)可绘制出直流电机在不同电枢电压下的机械特性曲线,如图1所示。

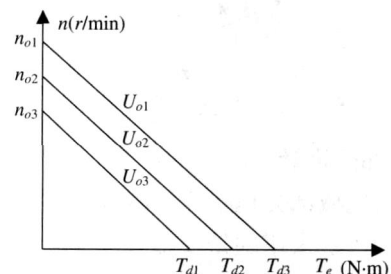


图1 直流电机机械特性曲线

$$n = \frac{U_N}{K_e N} - \frac{R_{ad} + R_a}{K_e K_t \frac{1}{2} N} T = n_0 - n \quad (1)$$

为了实现带负载的位置控制,电机必须时刻输出电磁转矩来平衡负载的重力矩。在带动负载的时候,电机的转速为零,因此电机是处于堵转状态,所输出的力矩就是堵转转矩。由机械特性曲线可以看出:当 $n=0$ 时,机械特性曲线上的点对应的是堵转转矩,如图中 T_d 所示;在不同的电枢电压下,电机的堵转转矩不同,而且这两者是成一定线性关系的,其关系如式 (2) 所示。

$$T_d = K_t \frac{U_a}{R_a} = K_t I_d \quad (2)$$

由此可见,利用改变电枢电压的方法,可以实现对电机堵转转矩的控制,从而实现带负载的角度位置控制。系统中采用的是 PWM 调节占空比的方法来实现对电枢电压的控制。

1.2 负载计算

负载是通过螺丝固定在联轴器上的。联轴器的轴平行于水平面。负载物块的轴和联轴器的轴垂直,且负载的中轴线是位于铅垂面内。对驱动负载所需的力矩进行计算:

将转矩微元化并经过定积分可以算得负载对电动机轴的转矩,如式 (3) 所示:

$$M = \int_0^{0.05} dM = \int_0^{0.05} (x+r) \cdot \sin \cdot \frac{0.123}{0.05} \times 9.8 d_x \quad (3)$$

计算出电动机轴带动圆柱形负载所需输出的转矩为 $0.0373674 \sin \text{ N} \cdot \text{m}$,根据负载与铅垂线的夹角不同,转矩的范围为 $0 \sim 0.373674 \text{ N} \cdot \text{m}$,当且仅当负载与铅垂线成 90° 时,出现最大转矩 $0.0373674 \text{ N} \cdot \text{m}$ 。因此,可以根据这一转矩目标选择直流电机的型号。系统选择的是 SYL - 0.5 直流力矩电机,其最大堵转转矩为 $0.049 \text{ N} \cdot \text{m}$,电动机轴的受力分析如图 2 所示。

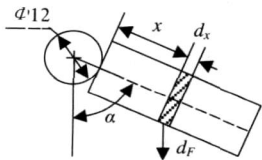


图 2 电动机轴的受力分析图

1.3 机械部分设计

系统的机械部分包括联轴器和旋转电位器的支架两部分。系统采用的是模拟式的旋转电阻作为位置检测装置,所以必须将旋转电位器的轴和电动机的轴同轴连接。系统中的直流力矩电动机已经被固

定在了电机座上,因此直流电机的轴和旋转电位器的轴直接相连就需制作相应的机械部分,包括一个支架和一个联轴器。该支架将起到两项作用:一是将悬空的旋转电位器固定住;二是将旋转电位器的轴与直流电动机的轴调到同一高度。联轴器的作用是将旋转电位器和电机的轴连接在一起,并保证两者转角的严格一致。

2 系统硬件电路设计

2.1 系统功能

直流电机位置闭环控制系统的主要功能是:控制直流力矩电机在空载或负载的条件下,快速准确地到达指定位置。因此,系统需要具有以下功能:实现给定值的输入和电机轴位置的同步显示;完成对电机轴的位置检测;完成一定的电动机位置控制算法;产生控制信号并驱动电动机。系统的功能框图如图 3 所示。



图 3 直流电机位置闭环系统的功能框图

2.2 系统电路总体设计

因为在设计时就是按功能模块分的,所以体现出硬件电路上,该系统一共包含以下几大部分:人机交互部分、单片机最小系统部分、光电隔离部分、电机驱动部分、位置传感器部分、A/D 转换器部分、电源及插头部分。整个位置闭环系统的结构组成如图 4 所示。

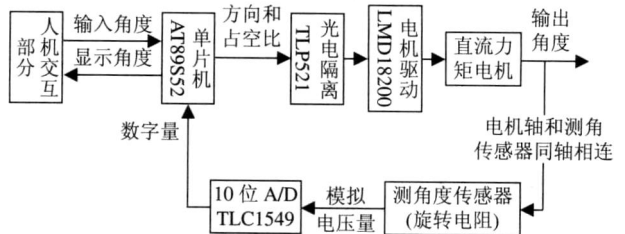


图 4 直流电机伺服系统结构组成框图

3 系统软件设计

系统软件包括:PD 控制程序、A/D 转换程序、PWM 程序、LED 程序、按键程序。文中只给出负载下的主程序和控制算法程序,PD 控制子程序流程如图 5 所示,位置控制子程序如图 6 所示。

在进行电机位置控制之前输入设定值,包括转动方向和转角,这就需要按键子程序的配合。图中的“检测电机位置”指的是利用旋转电位器和 A/D

转换芯片将电机的角度信号转化成数字量。该数字量就是输入给单片机的位置检测值,将该检测值和目标值比较之后就可以得出当前时刻的误差值。采用增量式 PD,它是利用当前时刻和前两个时刻的误差值来产生控制信号,系统中的控制量是指 PWM 波的占空比。不同占空比对应的是不同的堵转转矩。将电机轴转动到了指定角度就意味着一次位置控制的完成。如果不按“确定键”,电机会始终稳定在该角度;当按下了“确定键”之后,就可以再次输入设定值。这样就实现了对电机轴位置的连续控制。

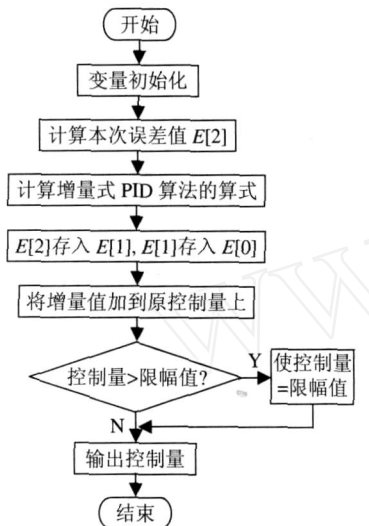


图 5 PD控制子程序

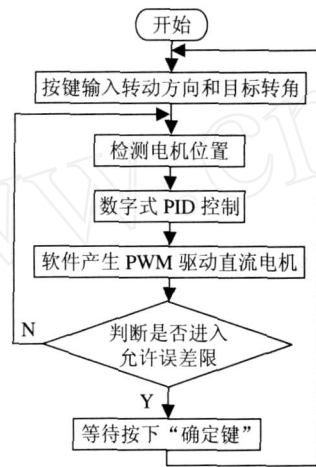


图 6 位置控制主程序

4 系统非线性研究

4.1 系统非线性分析

系统非线性主要由反馈通道的非线性和机械部分的非线性组成。

反馈通道主要是指一个闭环控制系统中的检测与转换部分,在该系统中则指的是角度传感器和 A/D 转换芯片这两部分。角度传感器采用的是模拟式的旋转电位器 WDD35D,其旋转电位器的总阻值为 1k,独立线性度为 $\pm 0.5\%$,也就是说在阻值随着角度进行线性变化的时候,每个角度对应的阻值会存在 ± 5 的误差。A/D 转换芯片:10 位 TLC1549,也是不可避免的会出现舍入误差。

系统中主要有 3 大机械部分:联轴器、旋转电位器的固定支架、电动机及其所带的负载。这些部分引入的非线性主要有:机械摩擦非线性、死区非线性、不对称非线性等。

4.2 系统非线性测量

根据实验测出的数据,可以绘制出实际的旋转电位器和 A/D 转换部分的输入输出曲线,如图 7 所

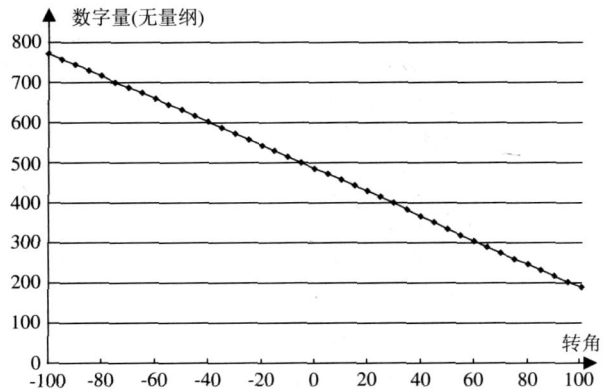


图 7 反馈通道线性度曲线

示。曲线的输入即 X 轴,是电动机轴的实际转动角度,其范围是 $-90^\circ \sim +90^\circ$;曲线的输出即 Y 轴,是经过旋转电位器和 A/D 转换后的数字量。数字量的满值是由 A/D 的位数决定的,系统选用的是 10 位的 A/D 转换器,所以 Y 轴的满值是 1024。

由曲线的形状可以看出,输入输出关系基本呈直线形状,说明了由反馈通道引入的非线性不是很严重的。实验测出的角度值及其对应的数字量,可以用作角度测量装置的分段线性化。

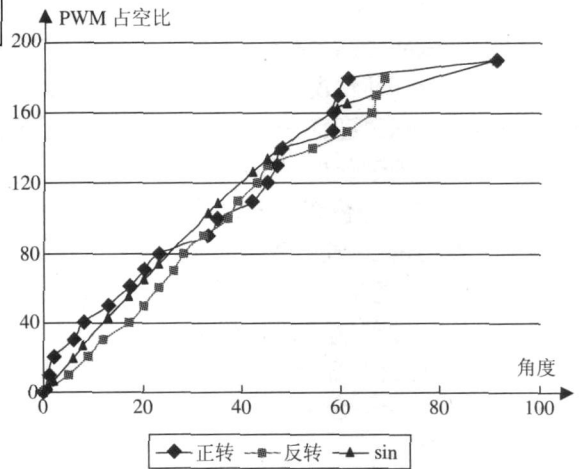


图 8 开环控制曲线

机械部分的非线性难于直接测量,所以测量的是负载情况下的开环控制曲线,如图 8 所示。图中,菱形数据点构成的是正转开环控制曲线,方块数据点构成了反转开环控制曲线,而三角形数据点对应的是 $\sin(\text{转角})$ 曲线。根据上面的理论计算,电动机轴带动该圆柱形负载时,无论正、反转需要输出的力矩都和电动机轴的角度成 \sin 关系。即图中的“ \sin ”曲线就是电动机负载开环控制的理论曲线。从实际电机运行的情况来看,实际曲线和理论曲线

有着不小的差别。

4.3 非线性解决的方法

反馈通道的非线性采用分段线性化的思想进行补偿。根据测得的数据,可以将每 5 作为一个线性段,认为在这 5 范围内,角度和 A/D 转换后的数字量是呈线性关系的。这样就可以将 A/D 转换后的数据利用查表并计算的方法,找到该数字量所对应的实际电动机转角。例如,当 A/D 转换后的数字量为 472 时,经过查电机转角与 A/D 转换值表,数字量 472 对应的模拟转角是正转 5°;那么就可以直接将这个 5 作为电动机轴当前的实际转角。若当 A/D 转换后的数字量为 469,经过查询表发现,该值大于模拟转角为 +5 时对应的数字量 472。那么,就可以将数字量 472、模拟角度 +5 作为起点计算当前的转角。根据式 (4) 可知,A/D 转换后的数字量 1 对应模拟转角的 0.351 562 5°:

$$\frac{1}{0.351\ 562\ 5} = 2.844\ 3 \quad (4)$$

式 (4) 中计算的结果,数字量变化 3 大约对应模拟转角变化 1°。所以计算数字量 469 所对应的实际电动机轴转角如式 (5)。经过舍去小数部分后,最终结果是 6。

$$5 + \frac{472 - 469}{2.844} = 6.054\ 687\ 5 \quad (5)$$

对于机械部分的摩擦、不对称等非线性,可以根据测出的系统开环情况下负载控制曲线,采用先开环快速逼近目标角度,后闭环精确控制角度的方法,来实现电动机的带载情况下的位置控制。

通过占空比与位置的开环表,找到一个比目标值稍小一点的角度;通过查询表,找到该角度所对应的 PWM 占空比的值;然后,输出该占空比的 PWM,以控制电机轴转到这一比目标值稍小一点的角度;最后,再引入闭环控制,使电动机轴带动负载精确的

达到目标角度。

5 总结

系统选择了旋转电位器作为角度测量装置,辅以 A/D 转换器等电路,利用 AT89S52 单片机实现了直流电机在空载和负载情况下的位置控制。针对实际系统中存在的非线性问题,该文提出了补偿方法。

系统最终的控制效果:

空载条件下,电机在 +90° ~ -90° 的范围内可实现位置控制。系统的时域性能指标为:动态性能,超调量 $\sigma_p = 0\%$,实测的调节时间在 1 ~ 2 s 之间;稳态性能,稳态误差为 0°。

负载条件下: +70° ~ -70° 之间,可以进行良好的位置负载控制。稳态误差可以达到 0°;调节时间在 3 ~ 4 s 之间。角度值大于 70 时,由于非线性因素的影响,虽然可以进行位置控制,但是稳态误差变成 1°;调节时间也加长到 4 ~ 7 s 之间。

参考文献:

- [1] 丹尼斯 克拉克,迈克尔 欧文斯. 机器人设计与控制 [M]. 宗光华,张慧慧,译. 北京:科学出版社,2004.
- [2] 戴佳,戴卫恒. 51 单片机 C 语言应用程序设计实例精讲 [M]. 北京:电子工业出版社,2006.
- [3] 孙育才,王荣兴,孙华芳. ATME1 新型 AT89S52 系列单片机及其应用 [M]. 北京:清华大学出版社,2005.
- [4] 徐爱钧,彭秀华. Keil Cx51 V7.0 单片机高级语言编程与 μ Vision2 应用实践 [M]. 北京:电子工业出版社,2005.
- [5] 陈伯时. 电力拖动自动控制系统 [M]. 北京:机械工业出版社,2007.
- [6] 黄立培. 电动机控制 [M]. 北京:清华大学出版社,2003.
- [7] 谷腰欣司. 直流电动机实际应用技巧 [M]. 王益全,译. 北京:科学出版社,2006.
- [8] 李铁才,杜坤梅. 电机控制技术 [M]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2000.

(上接第 54 页)

控制器有更好的控制效果,并且能够在放线机卷径变化时,控制效果良好。

参考文献:

- [1] 郭 帅. 机电张力系统关键控制技术的研究及实践 [D]. 上海大学博士学位论文,2006.
- [2] 汤旭晶,戴 忠,俞忠明,等. 拉线放卷恒张力控制系统的研究 [J]. 电气传动自动化,2006,28(1): 34 - 35.
- [3] 章兼源. 大卷径、快放卷恒张力控制系统的分析与设计 [J]. 东南大学学报,2005,35 SUP(1D): 248 - 252.
- [4] 李五田,韩大鹏,张丽华. 层绕机排线及恒张力控制的设计 [J]. 金属制品,2007,33(2): 45 - 47.
- [5] P. Cominos, N. Munro. PD controllers: recent tuning meth-

ods and design to specification [J]. IEEE Control Theory Application, 2002, 49(1): 46 - 53.

- [6] Kiam Heong Ang, Gregory Chong, YunLi. PD control system analysis, Design, and Technology [J]. IEEE Transactions on control systems Technolgy, 2005, 4(13): 55 - 57.
- [7] Wen - June Wang, Hwan - Rong Lin. Fuzzy control design for the trajectory tracking in phase plane [J]. IEEE Trans on Systems, Man, and Cybematics, 1998, 28(5): 710 - 719.
- [8] 李晓理. 多模型自适应控制算法的性能分析 [J]. 系统仿真学报, 2007, 19(4): 815 - 819.

