

双闭环测控技术在口腔种植机中的应用*

张照良 郭庆 徐翠锋

(桂林电子科技大学电子工程与自动化学院 桂林 541004)

摘要: 无刷直流电机在很多应用中对速度和转矩的测控技术要求比较高,要求速度和转矩恒定输出,但是两者存在相互制约的矛盾,难以实现在速度、转矩的恒定可调。以口腔种植机为研究对象,经过比对国外标准口腔种植机的技术指标,提出了双闭环测控方案。实现了速度恒定输出的同时,转矩在一个滞回误差内也稳定输出。由于口腔种植机本身的结构局限,对于扭矩的测试与控制是一难点,采用的是直接测控定子磁链的方法来实现扭矩的测控。

关键词: 无刷直流电机;双闭环测控;直接转矩控制

中图分类号: TP13 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 520.60

Dual-loop control technology in oral planting machine

Zhang Zhaoliang Guo Qing Xu Cuifeng

(Guilin University of Electronic Technology, College of Electronic and Automation, Guilin 541004, China)

Abstract: Brushless DC motor needs a higher requirement about the control technology of speed and torque in many applications, to achieve a constant output of speed and torque, but there is a contradiction between the two mutual restraints, it is difficult to achieve in terms of speed, torque adjustable constant. In oral planting machine for the study, after more than a standard oral planter on foreign technical indicators, proposed dual-loop measurement and control solutions. To achieve a constant output speed, while the torque can be achieved in a stable output hysteresis range. Due to the structure of the limitations of Oral Implantology machine itself, for torque testing and control is a major difficulty, this paper is a direct method of controlling the direct control of the stator flux to achieve torque.

Keywords: brushless DC motor; dual-loop control; direct torque control

1 引言

随着经济和社会的发展,人们越来越重视口腔的健康,1台精度高、性能稳定、安全可靠的口腔种植机是牙科医生的必备工具^[1]。

我国在口腔种植领域发展较国外晚近30年,在相关技术和国外还有很大的差距。目前国内的种植机大部分来自进口,手术费用高,成为国内种植技术发展的最大障碍^[2]。为推动国内种植领域的发展,应该大力发展国产种植系统,提高国产种植系统的质量。需要突破的技术难点在于:转矩的脉动、转矩过大、速度的不稳定会对牙齿造成预料不到的损害。1台高性能的口腔种植机,需工作在恒速恒扭矩的状态。采用了双闭环测控技术,重点在于转矩

的闭环控制,引入了直接转矩控制的方法:一方面实现速度的恒定输出,另一方面实现转矩的瞬时控制。

2 系统结构

鉴于手术的顺利进行和患者的安全要求,口腔种植机在使用中要在不同负载下,实现转速和扭矩的恒定输出。由于两者存在着相互制约的关系,该文引入双闭环控制系统,对2个调节量进行运算,来实现转速恒定输出的同时,转矩在一个滞回误差内稳定输出。如图1所示系统结构,主要功能是控制手术钻(图中表示为BLDCM)的速度和转矩,并对手术钻的速度和转矩进行实时的检测,并且要显示当前的运行状态,对失调状态进行报警,此外还要控制消毒药水的流量等功能。

收稿日期:2015-02

* 基金项目:广西重点学科重点实验室(新型专用数控设备研发中心)、桂林市科学技术局(LD14042E)资助项目

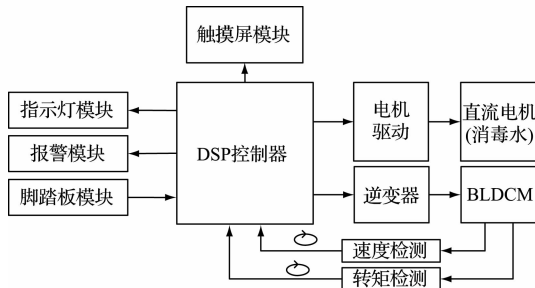


图1 系统结构

3 转速环设计

为了提高 DSP 的运行效率以及获取转速的实时性与准确性。系统选用测速芯片 MC33039,将电机转速通过 F/V 变换,获得与速度调整量所对应的电压变化量送入到 DSP 中作为 PI 调节的输入量,进而通过 PI 调节获取扭矩调节的变化量,最后通过调压方式实现转速和扭矩的调节^[3]。

4 转矩环设计

4.1 直接转矩控制原理

直接转矩控制依据的原理见式(1):

$$T_e = k_m |\psi_s| |\psi_r| \sin\theta \quad (1)$$

式中: k_m 为转矩 $T_e = \frac{3}{2} p(\varphi_{\alpha} i_{\beta} - \varphi_{\beta} i_{\alpha})$ 系数, φ_s 为定子磁链, φ_r 为转子磁链, θ 为定转子夹角。 k_m 、 $|\varphi_r|$ 近似恒定值, φ_s 可控,在保证 $|\varphi_s|$ 不变的情况下,控制 φ_s 的旋转速度,就可改变夹角 θ 。

转矩的观测方法^[4]如式(2):

$$T_e = \frac{3}{2} p(\varphi_{\alpha} i_{\beta} - \varphi_{\beta} i_{\alpha}) \quad (2)$$

式中: p 为极对数, φ_{α} 、 φ_{β} 、 i_{α} 、 i_{β} 分别为定子磁链和相电流在 $\alpha\beta$ 坐标上的分量。

4.2 空间电压矢量

无刷直流电机通过电子换向来实现电机的连续旋转,换向信号来自位置传感器,电机旋转 1 周,需要实现 6 次换向,换向信号经过逆变桥驱动电路,输出当前的供电电压。电机旋转 1 周至少需要向逆变器输出 6 种开关状态,若 0 表示开关管断开,1 表示导通,则 6 种开关状态对应于 $\alpha\beta$ 坐标系下 6 个非零电压空间矢量^[5](如图 2 所示)分别为

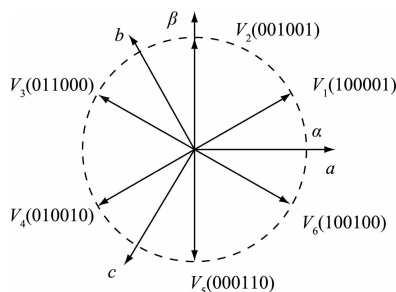


图2 空间电压矢量

$V_1(100001)$ 、 $V_2(001001)$ 、 $V_3(011000)$ 、 $V_4(010010)$ 、 $V_5(000110)$ 、 $V_6(100100)$ 。图中的 a 、 b 、 c 为定子三相坐标系, α 、 β 表示 $\alpha\beta$ 坐标系。

4.3 空间电压矢量和定子磁链的关系

定子磁链 φ_s 的观测方法^[6]如式(3):

$$\varphi_s = \int (u_s(t) - i_s(t)R_s) dt \quad (3)$$

为了便于分析,可忽略定子电阻,简化为:

$$\varphi_s = \int u_s(t) dt \quad (4)$$

以六边形磁链运动轨迹(如图 3 所示)为例^[7]:当前的定子磁链为 φ_u ,提供电压为 V_4 ,定子磁链顶点沿着 L_3 运动,至交点 A 时,提供电压 V_5 ,定子磁链顶点沿着 L_4 运动,如此运动,形成六边形磁链轨迹。

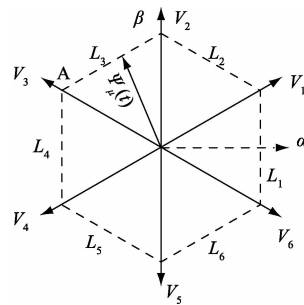


图3 六边形磁链轨迹

六边形磁链运动轨迹中,定子磁链的幅值在变化,在每条边的端点幅值最大,在中点幅值最小,磁链的这种变化会引起转矩的脉动。为了抑制转矩脉动,需要优化磁链轨迹,使磁链轨迹近似圆形,改进方法就是引入滞环比较的方法,使定子磁链运行在类圆形轨道上,如图 4 所示以扇区 I 为例,若要增大定子磁链,则用 V_1 、 V_2 、 V_6 ;如果要减小定子磁链,则用 V_3 、 V_4 、 V_5 。其他扇区的控制与扇区 I 类似。

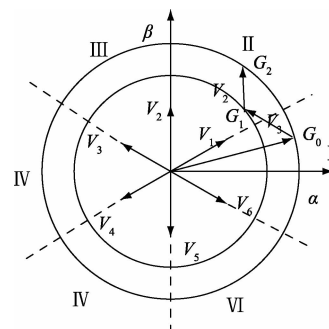


图4 类圆形磁链轨迹

4.4 空间电压矢量和转矩的关系

控制转矩就是如上阐述,控制定子磁链的旋转速度,改变夹角 θ 。如图 5 所示在 t_1 时刻,定转子磁链的夹角为 $\theta(t_1)$,此时给出电压矢量 V_3 ,定子磁链沿着 $\Delta\varphi_u$ 的方向运动至 $\varphi_u(t_2)$,期间转子磁链的旋转速度受定子频率平均值 ω_0 的影响,滞后于定子磁链,所以定转子磁链的相对速度变大,磁通角变大,转矩相应增大。若在 t_1 时刻给出零电

压矢量,则定子磁链不动,转子磁链会继续按 ω_0 的速度转动,则磁通角减小,转矩相应减小。

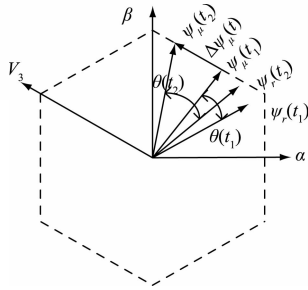


图5 电压矢量与转矩的关系

4.5 磁链与转矩的调节

磁链在每一扇区都有3个电压矢量使转矩和磁链幅值增大或减小。零电压矢量可使磁链状态不变。在调节过程中,磁链和转矩都是通过滞环控制的,比较结果分别用 $\Delta\psi$ 和 ΔT 表示,分别用1、-1、0表示转矩的增加、减小和不变,用1、0表示磁链的增大和不变,如表1所示。

表1 电压空间矢量开关选择

$\Delta\psi$	ΔT	扇区					
		I	II	III	IV	V	VI
1	1	V_2	V_3	V_4	V_5	V_6	V_1
	0	V_1	V_2	V_3	V_4	V_5	V_6
	-1	V_6	V_1	V_2	V_3	V_4	V_5
0	1	V_3	V_4	V_5	V_6	V_1	V_2
	0	V_0	V_0	V_0	V_0	V_0	V_0
	-1	V_5	V_6	V_1	V_2	V_3	V_4

4.6 系统的建模与仿真

在Simulink中进行系统的仿真,验证方案的可行性,整体结构图(如图6所示),系统的建模与仿真是在无刷直流电机仿真基础上添加了磁链和转矩的观测和比较部分^[8-10]如图7~10所示,由于无刷直流电机的仿真比较常用,该文就不再赘述,主要介绍下磁链和转矩的观测部分(如图11所示),包括坐标变换、磁链、转矩观测、滞环比较、PID控制、开关选择和pwm波生成等主要模块部分。

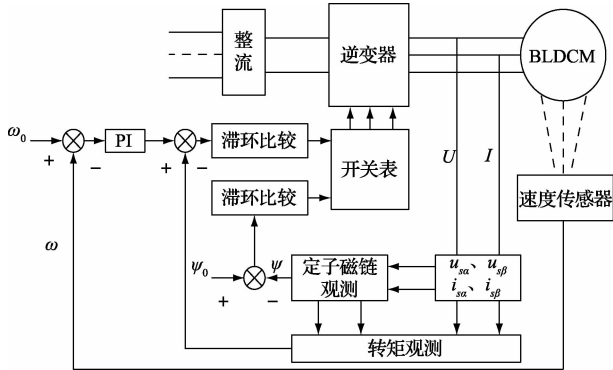


图6 转矩测控结构

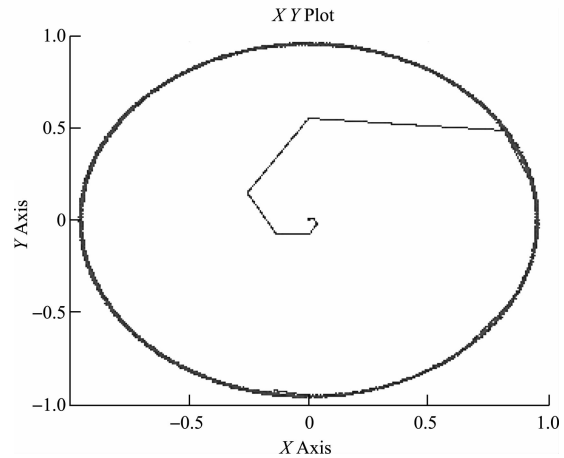


图7 定子磁链轨迹

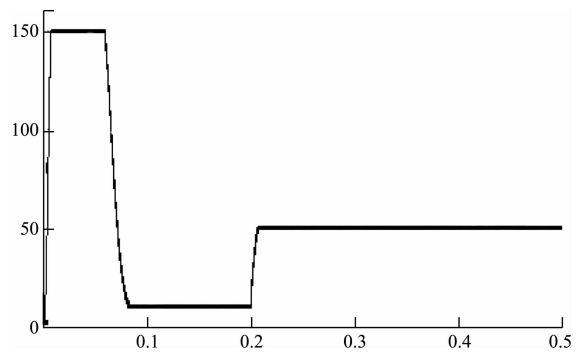


图8 电磁转矩

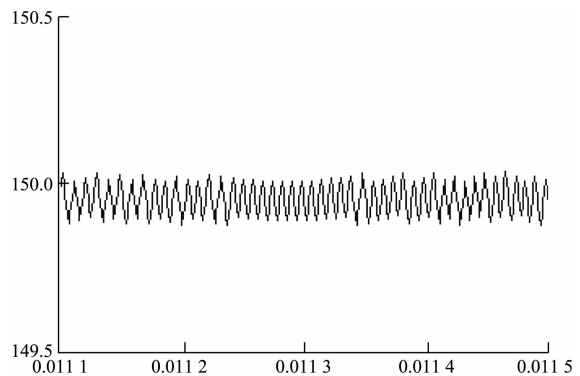


图9 局部放大转矩

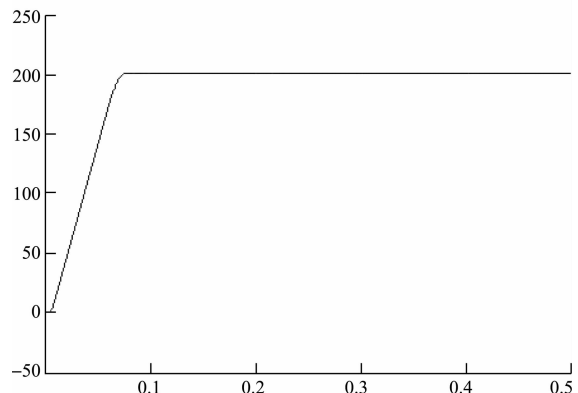


图10 转速

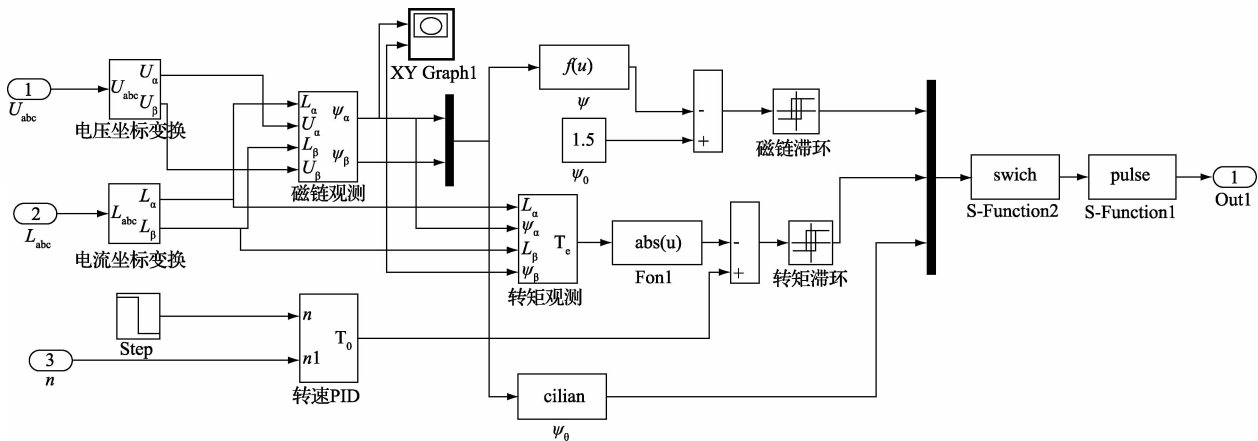


图 11 系统控制部分的仿真

通过仿真结果可得,定子磁链轨迹符合圆形轨迹,由分析可得定子轨迹越圆滑电磁转矩脉动越小,得到的电磁转矩的图形也符合理论分析,由转矩放大图形可以看到,转矩可以控制在 $\pm 0.1 \text{ N} \cdot \text{m}$,在一个误差内可以稳定输出。由图可得速度和扭矩的响应速度都在 0.1 s 以内,能实现快速的响应。速度的输出曲线稳定,也能达到理论要求,总体仿真效果可以验证方案的是可行的,控制效果也是比较理想的。

5 结论

通过理论分析与仿真研究,引入双闭环控制系统,可实现无刷直流电机的速度和转矩实时检测以及两者的稳定可调。圆形磁链的引入减小了转矩脉动,提高了无刷直流电机的动态性能,整套方案很好的解决了速度和转矩之间的矛盾问题,满足控制要求。

口腔种植系统中引入对转矩的控制可以实现转矩的恒定输出,抑制转矩的脉动,为解决口腔种植机中转矩恒定输出的难题提供了一个可行的方案。但是总体的测试效果是基于比较理想的情况下分析的,还需要在硬件电路上进行实际的分析和改进,比如,在高速状态和低速状态下,开关的频率不同导致手持电机发热不同,在高速状态下可采用六边形磁链轨迹来减小开关频率;在低速状态下磁链观测也存在积分的误差,可以试验放弃磁链观测部分,来进行补偿,减小测试的误差等。在实际应用中可围绕转矩控制为核心,来完善整套种植系统。

参考文献

- [1] 冯雪,郭庆,刘宝山,等. 双闭环测控技术在微型医用手术钻中的应用[A]. 2010中国仪器仪表与测控技术大会论文集,2010,31(8):26-29.
- [2] 周磊. 牙种植修复技术在我国的应用与发展[J]. 广东

牙病防治,2006,14(1):4-8.

- [3] 王玉梅. 基于DSP的无刷直流电动机控制系统的研究[D]. 济南:山东大学,2008:2-26.
- [4] 杨龙,朱俊杰,王亮军,等. 无位置传感器BLDCM换相转矩脉动抑制的研究[J]. 仪器仪表学报,2013,34(6):1285-1292.
- [5] 朱俊杰,粟梅,王湘中,等. 分段式滑模变结构无刷直流电机直接转矩控制[J]. 仪器仪表学报,2013,34(11):2634-2639.
- [6] LIU Y, ZHU Z Q, HOWE D. Instantaneous torque estimation in sensorless direct-torque-controlled brushless DC motors[J]. IEEE Transaction on Industry Applications,2006,42(5):1257-1283.
- [7] 朱剑波. 无刷直流电动机控制系统的仿真与分析[J]. 国外电子测量技术,2013,32(12):25-30.
- [8] 郭兴众. 采用滞环调节的直接转矩控制系统新型建模研究[J]. 电子测量与仪器学报,2008,22(3):16-20.
- [9] 王凯. 无刷直流电机的直接转矩控制研究[J]. 中国科技信息,2011(8):142-144.
- [10] 毕安宁. 无刷直流电机转矩脉动抑制研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2012:11-30.

作者简介

张照良,1989年出生,硕士研究生。主要研究方向为检测技术与自动化。

郭庆,1962年出生,教授。主要研究方向为微弱信号测控技术、嵌入式测控技术及虚拟仪器技术。

徐翠锋(通讯作者),1977年出生,讲师。主要研究方向信号处理、微弱信号测控技术。

E-mail: 343183324@qq.com