

微电机 伺服技术

· 中文核心期刊 · 中国科技论文统计源期刊 · 中国学术期刊(光盘版) · 国家机械工业局优秀期刊 · 陕西省优秀期刊
· 中国电工技术学会微特电机专业委员会
· 中国电器工业协会微电机分会 · 机械工业微电机科技情报网

协 办

2000 年第 33 卷第 5 期(总第 116 期)

目 次

设计与研究

- 混合式步进驱动单元的高速运行性能 王宗培 韩光鲜 程 智,等(3)
内嵌式 SMA 电机的设计与建模 杨 凯 辜承林(7)
开关磁阻无刷发电机自励磁机理 李声晋 励庆孚 卢 刚,等(10)
摩托车起动机新型磁瓦的设计 季致和 王顺清 张国富(12)
稀土永磁同步发电机 CAD 系统 罗 玲 刘景林(14)

伺服技术

- 用神经网络进行异步电机转速的辨识和估计 马宪民(16)
交流伺服系统在铜坯牵引机中的应用 杨铁钢(19)
永磁伺服电机的鲁棒控制技术 陈渊睿 吴 捷 张 宙(21)
步进电机细分控制函数修正方法研究 张志利 黄先祥 刘春桐(25)

综 述

- 无传感器电机位置检测策略综述 谢宝昌 任永德 刘文瑛(29)
电力电子器件的现状及其未来动向 唐苏亚(32)
永磁直线同步电动机垂直运输系统的研究现状 汪旭东 袁世鹰 焦留成,等(35)

测试技术

- 直流电压下电力设备泄漏电流计算机检测方法 刘少克(39)

工艺与装备

- 影响电枢动平衡的原因及解决方法 陈稚文(41)
Y2-100 机座加工工艺分析 武泽永 岳维平 宋并丽(44)

技术讲座

- 电机控制集成电路的选用——第九讲 直流电刷电机控制器 TPIC2101
..... 邹继明 刘喜民 丛晶日,等(46)

普及与提高

- 抽油机用稀土永磁同步电动机的研制 薄保中 苏彦民 谢力华,等(48)
电枢反应和磁钢对起动机换向的影响 方光辉(50)

使用与维修

- 洗衣机电机及相关部分的维修 侯 源(52)

国外动态

- 降噪节能的大转矩电动机变频驱动(54)低噪声高转矩的电动转向装置用电动机(54)重复定位精度高的直动传动机构(54)工业用铝壳小电机(54)直径 22mm 功率 20W 的无刷直流电机(54)直径仅 6mm 的无刷电机(54)静电悬浮微电机(54)

广告与讯息

- 青智仪表(56)石家庄市三佳科技有限责任公司系列产品简介(57)超低震动型驱动电流、步进电机(58)驱动科技的专家(59)电机驱动电路、霍尔效应传感器等 16 则(60)2001 年全国微电机会议征文通知等 8 则(64)

微电机 伺服技术(1972 年创刊 双月刊 公开发行)

编辑出版:《微电机》编辑部(西安桃园西路 2 号,
邮政编码:710077)

主 编:吴元标
副 主 编:牒正文
编 辑:贾 钰
主 管:西安微电机研究所
主 办:西安微电机研究所
刊 号:ISSN 1001-6848
CN61-1126/TM

电 话:(029)4234772 4234773

E-mail:micmotor@pub.xaonline.com

http://www.machineinfo.gov.cn/micromotor

国内发行:陕西省邮政报刊发行局

订 阅:全国各地邮局

报刊代号:52-92

国外发行:中国国际图书贸易总公司
(100044 北京 399 信箱)

国外代号:Q4228

国际刊名代码(CODEN):WIDIF4

广告经营许可证:6101004004005

印 刷:陕西人口报印刷厂

国内定价:4.00 元

全年定价:24.00 元

出版日期:2000 年 10 月 25 日

永磁伺服电机的鲁棒控制技术

陈渊睿¹, 吴捷¹, 张宙²

(1. 华南理工大学, 广东 广州 510640;

2. 香港理工大学, 香港)

摘要: 伺服电机及控制器的性能对于先进运动控制系统是至关重要的。文中给出了永磁伺服电机的模型, 分别介绍了几种鲁棒控制理论在伺服电机中的应用, 并对用于实现这些先进控制算法的数字信号处理器(DSP)也作了强调说明, 文章最后做了总结。

关键词: 永磁伺服电机; 鲁棒控制技术; 数字信号处理器

中图分类号: TM383.4; TM921.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-6848(2000)05-0021-04

Robust Control Techniques in Permanent Magnet Servomotors

CHEN Yuan-rui¹, WU Jie¹, ZHANG Zhou²

(1. South China Univ. of Tech., Guangzhou 510640, China; 2. Hong Kong Polytechnic Univ., Hong Kong, China)

Abstract: The performance of servomotors and their controllers is vital to advanced motion control systems. In this paper, the model of permanent magnet servomotors is presented. Several robust control theories and their applications in servomotors are introduced respectively. DSPs, which are used to implement these advanced control algorithms, are also emphasized. A summarization is made at the end.

Key words: PM servomotor; robust control techniques; DSP

1 引言

伺服电机及其控制器的性能直接影响到整个传动控制系统的表现。目前一般采用永磁无刷电机作为伺服电机。其特点是永磁铁可节省大量的能源, 尤其在中大功率电机中效率更加明显。据估计, 永磁电机的损耗不及同样体积的感应电机损耗的 60%^[1]。而且永磁电机的气隙可以做得比感应电机的大得多, 因而电机的制造相对容易, 其功率因数仍比感应电机的高。而无刷电机则不需要电刷和换向器, 不存在电刷引致的发热问题, 可制成全密封形式, 免维护, 能在恶劣的环境中运行。转子惯量小, 具有很好的加速性能。永磁交流无刷电机更在低速下仍能平滑运行而对转矩脉动不敏感, 最适合做伺服电机^[2]。

以前的伺服电机一般采用直流无刷电机, 因为关于直流电机的理论已经非常成熟, 同时也是由于受限于当时的微电子和电力电子器件发展水平。然而这样的电机制造和安装都要比交流无刷电机复杂, 且难以克服低速下的纹波转矩。随着微电子和电力电子技术的迅速发展, 如高速数字信号处理器(DSP)、MOSFET、绝缘栅双极型晶体管(IGBT)、高

压集成电路(HVIC)等的出现, 以及现代控制理论借助于高性能器件越来越多地应用于实践, 永磁交流无刷电机正逐步取代直流电机而成为伺服电机的主流。

本文介绍鲁棒控制在伺服电机中的应用。广义地说, 鲁棒控制即是使系统对外部扰动和参数变化不敏感, 主要有自适应控制、滑模变结构控制、 H_∞ 和 H_2 优化控制、卡尔曼滤波(KF)等。这些控制理论都已较成熟, 但真正应用于实践的时间并不长, 主要是由于这些方法都较为繁杂, 用以前的硬件来实现难于达到实时性要求。数字信号处理器(DSP)的出现, 不仅使这些问题迎刃而解, 而且还能够实现更为廉价有效的方案, 如无传感器控制等。

2 电机模型

根据电路原理及电机统一原理, 任何电机经过适当的坐标变换都可以写成统一的方程式。永磁伺服电机在与转子同步旋转的 d-q 坐标系下的模型可写为:

$$\frac{di_d}{dt} = \frac{1}{L_d}(u_d + \omega L_q i_q - R i_d) \quad (1)$$

$$\frac{di_q}{dt} = \frac{1}{L_q}(u_q + \omega L_d i_d - R i_q - \omega \Psi_f) \quad (2)$$

收稿日期: 2000-07-13

基金项目: 香港理工大学研究基金资助(A-PB26)

$$\frac{d\theta}{dt} = \omega \quad (3)$$

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{J} [(L_d - L_q)i_d + \Psi_f]i_q - T_L \sin\theta \quad (4)$$

式中, u_d, u_q 和 i_d, i_q 分别是定子直轴(d)、交轴(q)的电压和电流分量, R 是定子电阻, L_d, L_q 是自感, J 是运动部分的惯量, Ψ_f 是永磁铁产生的磁通量, T_L 是负载转矩, ω, θ 分别是转子角速度和转角。上述方程将定子电流的励磁分量 i_d 和转矩分量 i_q 解耦开来, 分别对它们进行控制, 从而实现了交流传动系统的矢量控制, 得到可与直流电机媲美的性能。由上面的式子很容易写出系统的矩阵形式的状态方程, 将不确定项或干扰项也包括进去, 这里不再赘述。

3 自适应控制

自适应控制的研究最早起源于 50 年代初对高性能飞行器自动驾驶仪的设计^[3], 后来在航空航天、航海、矿山、电力系统等领域都得到了广泛的应用。它主要有两种类型, 即模型参考自适应系统(MRAS)和自校正调节器(STR)。两者之间并没有明显的界限。其基本思想是根据系统动态和扰动来实时地调节控制器参数或重新设计控制器。这些都需要大量的运算, 实际应用时可根据需要适当取舍。

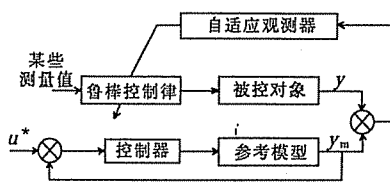


图 1 一种自适应观测器

自适应控制的思想可用于观测系统的扰动或不确定性, 构成自适应观测器, 估计出不确定项的边界, 据此确定鲁棒控制律, 如图 1 所示。文献[4]即采用了类似的方法。它将不确定性的观测值与实际值进行比较, 计入整个系统的误差动态中, 再由一个矢量处理器来实现鲁棒控制器设计, 用来调节参数变化和负载扰动下的控制输入量。仿真和实验结果表明, 这种方案比用积分-比例控制器大大提高了系统的动态性能, 系统响应的波动幅度和恢复时间都明显减小了, 从而增强了系统的鲁棒性。

4 滑模变结构控制

变结构控制(VSC)是一种高速开关的反馈控

制, 它根据系统的状态选择两个控制输入其中之一, 相当于系统有两种结构, 即

$$u = \begin{cases} u^+(x, t), & \text{当 } S(x) > 0 \\ u^-(x, t), & \text{当 } S(x) < 0 \end{cases} \quad (5)$$

其目的是使非线性对象快速到达预定的所谓“开关面”(也称“滑动面”) $S(x) = 0$, 并使其沿着这个开关面滑动, 这时称系统处于滑动模态(Sliding Mode)。

变结构控制的设计分两步: 第一步, 确定开关面, 此开关面所描述的状态就是期望系统应达到的动态指标。第二步, 设计开关控制器, 使系统向开关面运动, 并将其强行维持在开关面附近向平衡点滑动。因此, 变结构控制可使系统对扰动和参数不确定性具有较强的鲁棒性。

然而并不是所有系统都可实现变结构控制, 设计时必须先判断滑动模是否存在, 其条件由下式给出:

$$\lim_{S \rightarrow 0} S \cdot \dot{S} < 0 \quad (6)$$

滑动模一旦存在, 即可用等效控制法进行设计。理想的滑模变结构控制可以使对象在滑动面上平滑运动, 只要使开关频率达到无限大即可。但是实际上由于器件存在延时和滞环, 所以系统进入滑动态后不可避免地会出现抖振现象(chattering), 即在滑动面附近高频振动。如何消除抖振是一个必须认真考虑的问题, 否则可能会引起设备毁坏等事故。

文献[5]设计了一种离散时间滑模控制器, 用来对直接驱动的直线电机进行位置控制。该系统用于检测印刷电路板生产线上的集成电路引脚是否正确。通过给误差向量 $e(k)$ 引入一个用户定义向量 G , 构成开关面 $S(k)$, 保证 $e(k)$ 在 $S(k) = 0$ 时是渐近稳定的。在用等效控制法设计控制律时, 给 $S(k)$ 引入一个加权因子 p , 改变 p 的取值可以使系统取得较佳的动态性能。实验结果表明, 电机电流没有出现抖振现象, 系统的定位精度可达 $1\mu\text{m}$, 速度超过 1.5m/s 。

5 H_∞ 和 H_2 优化控制

输出反馈 H_∞ 和 H_2 (LQG) 控制器都来源于线性 2 次调节器(LQR)的设计思想。它们可用统一的方框图表示, 如图 2 所示。图中 G 为增广被控对象, 它包括系统动态的不确定性、线圈动态、传感器动态、放大器、A/D、D/A 转换器的动态等, K 为控制器, y 为传感器测量输出值, u 为控制器输出, w 为所有外部输入, 包括扰动、传感器噪声、参考指令信

号、假信号以及不确定性的模型, z 为所有被控变量, 包括我们感兴趣的指标量、参考信号与实际输出的跟踪误差以及其它一些受限制的激励信号, 如电压、电流等必须在一定的范围内。

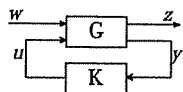


图2 H_∞ 和 H_2 控制框图

H_∞ 和 H_2 控制问题可归结为求反馈控制器 K , 使得某种意义下的性能指标 J 达到最小, 同时使闭环系统渐近稳定。对于 H_2 控制, 就是要使 w 到 z 的闭环传递函数 $T_{zw}(s)$ 的 H_2 范数 $\|T_{zw}(s)\|_2$ 满足:

$$\|T_{zw}(s)\|_2 < \gamma \quad (7)$$

类似地, 对于 H_∞ 控制, 就是要使 $T_{zw}(s)$ 的 H_∞ 范数 $\|T_{zw}(s)\|_\infty$ 满足:

$$\|T_{zw}(s)\|_\infty < \gamma \quad (8)$$

通常只要考虑 $\gamma < 1$ 的情况即可。由此可知, H_2 控制只考虑了功率谱密度为 1 的干扰信号, 即单位脉冲信号, 而 H_∞ 控制考虑了一个可描述的干扰集合。 H_2 设计是从最小能量角度来考虑的, 或者说它考虑的是闭环传递函数最大奇异值 $\sigma_{\max}[T_{zw}]$ 下所包的面积, 而不是峰值; 而 H_∞ 设计是使开环传递函数的最大奇异值 $\sigma_{\max}[G_{zw}]$ 的峰值最小, 因而在高频段需要更多的能量。

文献[6]将 H_∞ 控制理论应用于直传动系统的位置控制。它将电枢电流 i_a 、角速度 ω 、角位置误差 e_θ 及其积分 η 作为状态变量, 通过解 Riccati 不等式(求带约束条件的极值问题), 得到 H_∞ 控制器 K 。经实验并与传统的串级控制相比较, H_∞ 控制在超调量和响应时间方面均占优, 且它基本上不随负载条件而变化, 证明它确实有极强的鲁棒性, 而且在硬件实现上还省去了电流滤波器。

6 Kalman 滤波法

卡尔曼滤波(KF)是由 Rudolph E. Kalman 于 50 年代末 60 年代初提出来的, 它代替了 Wiener 滤波。卡尔曼滤波器是动态非线性系统在最小二乘意义下的最优状态估计器, 也即状态变量的最小方差估计器。对于带非相关高斯过程和量测噪声的非线性随机系统, 它是概率分布状态的最优条件均值和协方差的计算估测器。此时系统的状态空间模型可描述为:

$$\dot{x}(t) = f(x(t), u(t), t) + w(t) \quad (9)$$

$$y(t) = h(x(t), t) + v(t) \quad (10)$$

式(9)称为系统方程, $w(t)$ 为系统噪声, 包括负载扰动和参数变化等; 式(10)称为量测方程, $v(t)$ 为量测噪声或传感器噪声。 $w(t)$ 和 $v(t)$ 均为零均值的白高斯噪声, 其协方差矩阵分别为 $Q(t)$ 和 $R(t)$ 。

扩展卡尔曼滤波器(EKF)的作用就是要实时地给出状态变量 x 的估计值, 并且通过求解卡尔曼滤波器的方差方程在线地计算增益矩阵。EKF 的动态方程由下式给出:

$$\dot{\hat{x}}(t) = f(\hat{x}(t), u(t), t) + K[y(t) - h(\hat{x}(t), t)] \quad (11)$$

式中 $\dot{\hat{x}}(t)$ 为状态估计值 $\hat{x}(t)$ 对时间的变化率 $d\hat{x}(t)/dt$, $y(t)$ 为量测输出, $h(\hat{x}(t), t)$ 为预测(估计)输出, 令 $r(t) = y(t) - h(\hat{x}(t), t)$, 称为残差, K 为滤波器增益矩阵。

应用 EKF 时, 状态变量的选取以及矩阵 Q 、 R 和状态向量 $x(0)$ 的协方差矩阵 $P(0)$ 的初始值的确定都很重要, 它们直接影响到计算速度、稳定性和收敛时间。文献[7]为了估计转子的角度和位置, 重新选取反电动势和角速度作为状态变量, 而不是取 dq 轴定子电流, 这样 EKF 模型由 4 阶降到 2 阶, 成为降价滤波器, 大大缩短了计算时间。而 Q 、 R 、 $P(0)$ 的初始值则用高斯噪声发生器来确定, 当然也可以凭经验用试凑的方法得到。最后系统做到了不需要机械参数, 可在不知转子初始位置的情况下在电机启动时就给出正确的位置和速度估计值, 它也不需要测量电压, 只需要两个电流传感器, 实现了无位置和速度传感器的高性能传动。

7 DSP 的应用

任何先进的算法最终都要通过一定的硬件来实现其目标。离开了硬件的强有力支持, 再完美的理论也只能是纸上谈兵, 无论应用于实践中。这就是理论上早已成熟的东西而在实际应用中却还差很远的原因。自 1982 年美国德州仪器(TI)公司的第一块 DSP 芯片问世以来, 各行各业迅速掀起了 DSP 应用热潮, 我国也于近几年开展了这方面的研究应用工作。目前, 一块很普通的 DSP 芯片速度达几十 MIPS (百万条指令每秒), 这是单片机所难以比拟的, 而最快的更高达近 9 000MIPS。DSP 正朝着集成度更高、功能更强、速度更快的方向发展, 它与正迅速发展着的功率器件相结合, 构成了目前受广泛研究和应用的高性能控制器和驱动器。同时它加快了成熟理论

的应用,促使了新理论的形成和新算法的产生,两者是相互促进的。文献[4,5,7]也都是用 DSP 来实现其所介绍的先进算法的。

DSP 与普通微处理器不同,它们内部结构的差异造成功能上有很大的区别。前者用来处理大量的数字运算工作,具有超强的数字处理能力。后者主要用来处理系统控制、协议转换及提供人机对话界面等非数字运算工作。实际的系统往往是两者并存,互相配合。可以预料,两者的区别将越来越小。

以德国 dSPACE 公司的 DS1102 控制卡为例说明 DSP 的应用。DS1102 是一个单板系统,可直接插在 PC 机的 ISA 总线插槽内。它是专为高速多变量数字控制器的开发和实时仿真而设计的,用在很多领域,如机器人、液压伺服和电气致动器、磁盘驱动伺服控制、传动控制、车辆控制、有源振动控制、有源振动隔离等。它以德州仪器公司的第三代浮点 DSP—TMS320C31 作为主处理单元,为繁杂的数值算法提供了快指令周期时间。板上集成了 A/D、D/A 转换器,一个基于 DSP 微控制器 TMS320P14 的数字 I/O 子系统和增量传感器接口。这些特点令 DS1102 成为数字控制任务的一个理想解决方案。

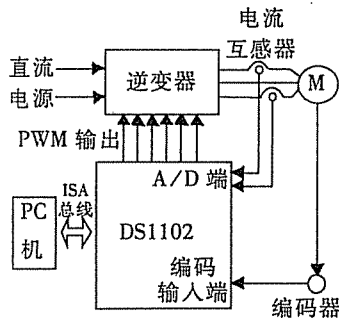


图3 一个 DSP 应用例子

图3为 DS1102 的一个典型应用示例。由图可知,外部器件只需逆变器、电流互感器、增量编码器等。电流互感器的输出信号送至控制卡的 A/D 端,增量编码器的输出信号直接与增量编码输入端连接,而控制卡的 PWM 输出信号送到逆变器的门极驱动端。在无位置速度传感器的应用方案中,还不需要增量编码器,电路变得更加简洁。控制卡附带的应用程序与美国 Math Works 公司的仿真工具 MATLAB 结合非常紧密,用户可以直接在 PC 机上用 MATLAB 绘出方框图,然后由应用程序将方框图翻译成 C 程序、进行编译、链接、生成 DSP 的执行程序,最后自动将此执行程序下载到控制卡并启动它。PC 机还可用来实时地修改参数,显示被控对象运行状态,一些在实际中无法测量的变量也可以用它来

观测,十分方便。由此可见,DSP 不仅仅其数字运算速度快,而且还大大简化了设计,缩短了研究开发周期,是今后高性能数字控制的主要发展方向。

8 结 语

本文总结了几种鲁棒控制理论在伺服电机中的应用,并介绍了实现先进控制算法的一种关键技术—DSP 的应用。实际应用时,往往要根据系统的具体特点来选择某种算法,或者是将几种算法有机结合起来。例如,可以构造一个自适应卡尔曼滤波器,减少在结构和参数选取时的人的经验因素的影响,使系统结合两种算法的优点,具有更强的鲁棒性。也可以设计出自适应滑模控制器,当找 H_{∞} 或 H_2 最优控制器困难时,可以尝试寻找次优控制器。当然,也可以引入智能控制的理论,设计自适应模糊控制器、模糊变结构控制器等,形成一体化的“智能电机”。DSP 在这些理论的实用化过程中起了极其重要的作用,今后它的应用必将越来越广。

参考文献:

- [1] Gordon R. Slemon. High-Efficiency Drives Using Permanent-Magnet Motors[J]. Proceedings of the IECON'93., 1993, 2, 725-730.
- [2] Carl Vangsness. Comparison of Brush and Brushless Servo Motor Designs[D]. 14th Annual Conference of Electrical Engineering Problems in the Rubber and Plastics, 1988, 60-65.
- [3] Karl J. Astrom. Adaptive Control (2nd Ed.)[D]. Addison-Wesley Publishing Company, 1995.
- [4] Faa-Jeng Lin. A Robust PM Synchronous Motor Drive with Adaptive Uncertainty Observer[J]. IEEE Trans. on Energy Conv., 1999, 14(4), 989-995.
- [5] K S Low. A High Performance Linear Motor Drive for Integrated Circuit's Leads Inspection System[J]. IECON'98, Proceedings of the 24th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, 1998, 3, 1321-1325.
- [6] C. Attaianesi. Robust Position Control of DC Drives by Means of H_{∞} Controllers[J]. IEE Proc. - Electr. Power Appl., 1999, 146(4), 391-396.
- [7] Yoon-Ho Kim. High Performance IPMSM Drives without Rotational Position Sensors Using Reduced-Order EDF[J]. IEEE Trans. on Energy Conv., 1999, 14(4), 868-873.

作者简介:陈渊睿(1969—),男,研究生,研究方向为永磁无刷电机的先进控制技术。