

基于跟踪微分器的永磁同步电主轴电流控制算法

于家斌¹ 王小艺¹ 许继平¹ 秦晓飞²

1. 北京工商大学,北京,100048 2. 中国科学院自动化研究所,北京,100190

摘要:永磁同步电主轴电流 PI 调节器存在阶跃响应超调与跟踪速度之间的矛盾,造成电流跟踪过程出现超调,增加了 PI 参数的整定难度。其原因主要是,控制的“快速性”与“超调”之间的矛盾是 PI 调节器的固有属性,为此,根据自抗扰控制理论,提出采用跟踪微分器为 d 轴和 q 轴电流指令安排过渡过程的方法,使 PI 调节器对输入电流阶跃信号的跟踪更加平滑。仿真和实验结果表明:相比于采用积分分离设计的 PI 调节器,该方法使电流更快速、平滑地跟踪指令值,且跟踪过程无超调,增强了电主轴电流控制的鲁棒性。

关键词:永磁同步电主轴;电流 PI 调节器;跟踪微分器;过渡过程

中图分类号:TP276

DOI:10.3969/j.issn.1004-132X.2014.02.010

Current Control Algorithm of Permanent Magnet Synchronous Spindle Based on Tracking-differentiator

Yu Jiabin¹ Wang Xiaoyi¹ Xu Jiping¹ Qin Xiaofei²

1. Beijing Technology and Business University, Beijing, 100048

2. Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100190

Abstract: The conflict between overshoot and response speed inherent in current PI regulator of PMSS was difficult to resolve, which would lead to the overshoot in the current tracking process and increase the difficulty on tuning PI parameters. As the contradiction between “fast” and “overshoot” was the inherent property of PI regulator, based on auto-disturbances rejection control (ADRC) theory, tracking-differentiator was adopted to arrange transient process for d/q current commands and the tracking process of PI regulator for current step signal was smoother. Simulation and experimental results show that, compared with integral separated PI regulator, the current values can track the commands more quickly and smoothly, and the overshoot in transient process is eliminated and the system robustness is strengthened.

Key words: permanent magnet synchronous spindle (PMSS); current PI regulator; tracking-differentiator; transient process

0 引言

永磁同步电主轴作为高精度数控机床的核心部件之一,在航空航天、汽车、精密仪器和模具加工等领域有着广泛的应用^[1]。永磁同步电主轴驱动系统一般采用电流、速度和位置三环结构,电流环作为最内环保证定子电流对电流指令快速、准确地跟踪,其控制性能直接影响位置和速度控制性能。另外,永磁同步电主轴弱磁控制的实质

是通过对 d 轴和 q 轴电流的控制来实现的,因此设计性能优良的电流环是永磁同步电主轴实现弱磁控制的关键。

永磁同步电主轴一般具有较小的转动惯量,即电主轴的机械时间常数很小,在数量级上甚至接近其电磁时间常数,因而电主轴对电流控制性能的要求很高。针对微小转动惯量永磁同步电主轴的电流控制,文献[2]将内模控制应用于电流环解耦控制中,减小了电主轴动态过程中反电势对电流环的影响,同时改善了电流动态性能;文献[3]提出了改进电流环控制器的方法,即在电流 PI 控制器中增加一个积分环节构成二重积分来

收稿日期:2013-08-06

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51179002);北京市科技新星计划资助项目(2010B007);北京市教委专项课题(PXM2013_014213_000044)

Zhang Xiongxi, Liu Zhenxing. Application of Resonance Demodulation and Wavelet Denosing in Fault Diagnosis of Induction Motors[J]. Electric Machines and Control, 2010, 14(6): 66-70.

(编辑 苏卫国)

作者简介:王建国,男,1963年生。东北电力大学自动化工程学院教授、博士。主要研究方向为电厂特殊参数测量及仪表智能化技术。吴林峰,男,1988年生。东北电力大学自动化工程学院硕士研究生,浙能乐清发电有限公司设备管理部助理工程师。秦绪华,男,1962年生。吉林省电力科学研究院有限公司教授、总工程师。

进行控制,可以消除动态过程中电流响应与给定值之间的差值。近年来,随着控制科学技术的发展,国内外学者也提出了一些基于智能控制的电流控制方法,如重复控制算法^[4]、无差拍控制算法^[5]、混合控制算法^[6]等先进的控制算法也都被尝试应用于永磁同步电主轴的电流控制中,但目前还不是很成熟。

本文以永磁同步电主轴为研究对象,针对电流 PI 调节器存在的阶跃响应超调与跟踪速度之间的矛盾,提出了采用跟踪微分器为电流指令安排过渡过程的方法;给出了一种基于数字信号处理器(digital signal processor, DSP)和可编程逻辑控制器(complex programmable logic device, CPLD)的实现方案;最后通过仿真和实验验证了算法的正确性和有效性。

1 永磁同步电主轴驱动系统

$d-q$ 坐标系下表贴式永磁同步电主轴定子电压方程^[7]为

$$\left. \begin{aligned} u_d &= R_s i_d + L_d \frac{di_d}{dt} - \omega_r L_q i_q \\ u_q &= R_s i_q + L_q \frac{di_q}{dt} + \omega_r L_d i_d + \omega_r \psi_f \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中, i_d 、 i_q 分别为 d 轴和 q 轴电流; u_d 、 u_q 分别为 d 轴和 q 轴电压; L_d 、 L_q 分别为 d 轴和 q 轴的同步电感,且 $L_d = L_q$; R_s 为定子相电阻; ω_r 为转子的电角速度; ψ_f 为转子永磁体励磁磁场的基波磁链。

图 1 为表贴式永磁同步电主轴驱动系统的控制框图。在基速以下时,采用恒转矩调速,也就是采用 $i_d=0$ 控制,则每单位定子电流产生的转矩最大,可获得最大转矩/电流比,相应的铜耗也最小。当转速超过基速时,逆变器直流侧电压达到最大值后会引起电流调节器饱和,通过调整电压获得更高的转速已经不太可能。为了实现基速以上的恒功率调速,需要对其进行弱磁控制。弱磁控制的实质是增加直轴去磁电流分量 i_d ,减小交轴电流分量 i_q ,以维持电压平衡。所以弱磁控制的关键就在于设计高性能的电流调节器,实现对 d 轴和 q 轴电流精确、有效的控制。

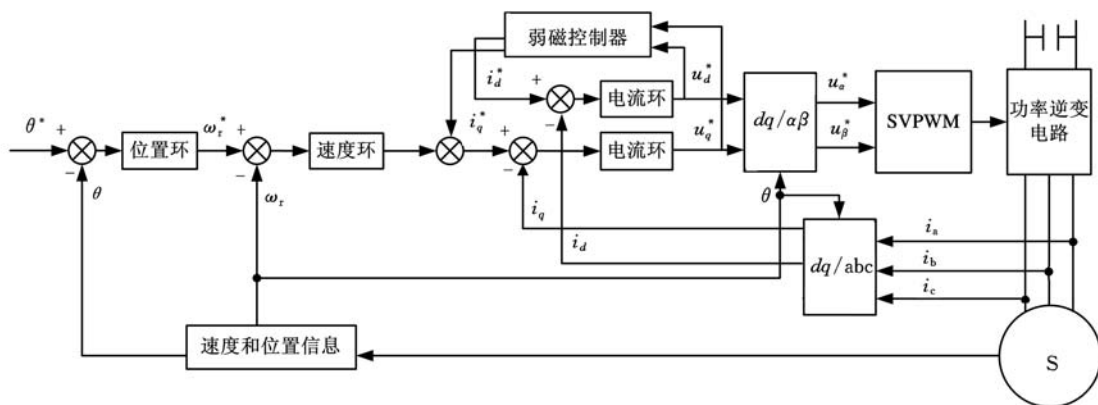


图 1 表贴式永磁同步电主轴驱动系统控制框图

2 自抗扰控制原理

经典 PID 控制是自动控制理论中发展最成熟、应用最广泛的一种控制技术,它是一种用控制目标与被控对象实际行为之间的误差来消除该误差的控制策略,具有不依赖精确的数学模型、结构简单、参数调整方便等优点,在控制工程实践中得到了广泛的应用。

虽然经典 PID 控制在实践中获得了大量应用,但其控制精度、速度响应以及对环境变化的适应能力等已不能满足高性能应用场合的控制要求。中国科学院系统科学研究所韩京清研究员及其合作者在继承经典 PID 控制器优点的基础上,针对 PID 控制的局限性,提出了自抗扰控制器(ADRC)^[8]。自抗扰控制器各部分为:跟踪微分

器(tracking differentiator, TD)、扩张状态观测器(extended state observe, ESO)、非线性反馈控制器(nonlinear law state error feedback, NLSEF)^[8-9]。

其中,跟踪微分器是一个信号处理环节,用以实现对输入信号过渡过程的安排及微分信号的提取。对于输入信号 v ,跟踪微分器给出两个输出信号 x_1 和 x_2 ,其中 x_1 跟踪输入信号 v ,而 x_2 是 x_1 的微分,可以当作信号 v 的微分。当输入信号发生突变时,跟踪微分器可以提供光滑的输出信号作为控制器的输入,从而使控制器的输入信号连续地变化,不会因为输入的突变而产生超调,增强了系统的稳定性。当存在外界扰动时,跟踪微分器还可以对输入信号实现滤波的作用。

线性快速跟踪微分器的方程为

$$\left. \begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2 \\ \dot{x}_2 &= -r \operatorname{sgn}(x_1 - v + \frac{x_2 |x_2|}{2r}) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中, r 为加速度因子。

大量仿真和实验表明,对于时变、非线性、强耦合、大时滞的被控对象,自抗扰控制器能实时估计并补偿系统的内外扰动,具有很好的控制品质。

3 采用跟踪微分器为电流指令安排过渡过程

通常情况下,永磁同步电主轴驱动系统中的电流调节器采用 PI 形式的调节器。“基于误差反馈来消除误差”是 PI 控制的精髓,但是直接取目标与实际行为之间的误差常常会使初始控制力太大而使系统出现超调现象。因此,控制的“快速性”和“超调”之间的矛盾是 PI 控制器的固有属性,这对矛盾增加了 PI 参数整定的难度,降低了系统的鲁棒性。由图 1 可以看出,电流 PI 调节器的输入信号是速度环给出的不同幅值的指令信号,如果直接取指令电流和实际电流之间的误差,则会因初始控制力太大而出现超调,导致对信号的跟踪效果不好。而且速度环给出的电流指令信号变化的幅值和频率都比较大,通常会引起逆变电路较大的 di/dt 和 dv/dt ,增大电主轴运行时的电磁干扰,同时降低功率器件的使用寿命。

为了避免积分积累引起的较大超调,一般会采用积分分离的 PI 调节器设计方法^[10],即当被控量与设定值的偏差较大时,取消或减小积分作用,以免由于积分作用降低系统的稳定性而使超调量增大;当被控量接近给定值或偏差较小时,引入积分作用,消除静差,提高系统的控制精度。但是在实际运用时发现,积分分离算法中的阈值需要凭经验获取,具有一定的偶然性,而且阈值选取的优劣对控制效果影响很大。同时,采用积分分量算法时,由于在偏差较大时取消了积分的作用,虽然可以避免超调现象,但却导致实际电流对指令值的跟踪时间变长,系统动态性能变差。

由自抗扰控制原理可知,为指令值安排合适的过渡过程是解决系统“快速性”和“超调”之间矛盾的有效手段。为此,本文采用为输入指令值安排过渡过程的方法来解决系统“快速性”和“超调”之间的矛盾,也就是采用跟踪微分器为电流环 PI 调节器输入的 i_d 和 i_q 指令值安排过渡过程,如图 2 所示。

由于实际的电主轴驱动系统中信号都是数字量,因此图 2 中的电流环输出信号并非连续信号,

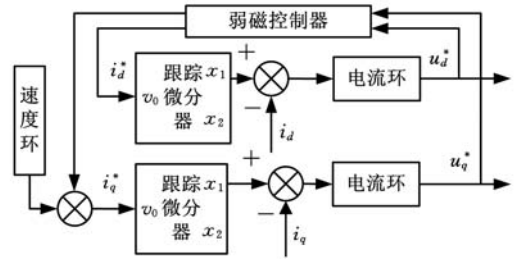


图 2 采用跟踪微分器为 d/q 轴电流指令值安排过渡过程结构图

而是离散的数字信号,根据文献[11],设计了离散形式的跟踪微分器:

$$\left. \begin{aligned} u &= ftd(x_1(k) - v_0, x_2, r, h) \\ x_1(k+1) &= x_1(k) + hx_2(k) \\ x_2(k+1) &= x_2(k) + hu \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中, u 为控制器的输出; v_0 为输入信号; x_1 为输出信号; x_2 为微分输出信号; h 为积分步长。

最速控制综合函数 $u = ftd(x_1, x_2, r, h)$ 的解释如下:

$$\left\{ \begin{aligned} d &= rh \\ d_0 &= hd \\ y &= x_1 + hx_2 \\ a_0 &= \sqrt{d^2 + 8r|y|} \\ a &= \begin{cases} x_2 + \frac{a_0 - d}{2} \operatorname{sgn}(y) & |y| > d_0 \\ x_2 + \frac{y}{h} & |y| \leq d_0 \end{cases} \\ ftd &= - \begin{cases} r \operatorname{sgn}(a) & |a| > d \\ r \frac{a}{d} & |a| \leq d \end{cases} \end{aligned} \right.$$

式中, d, d_0, y, a_0, a 为中间变量; r 为加速度因子, $r = 4/T_0^2$; T_0 为阶跃信号的过渡时长。

4 仿真结果

建立基于 MATLAB/Simulink 的跟踪微分器仿真模型,如图 3 所示。

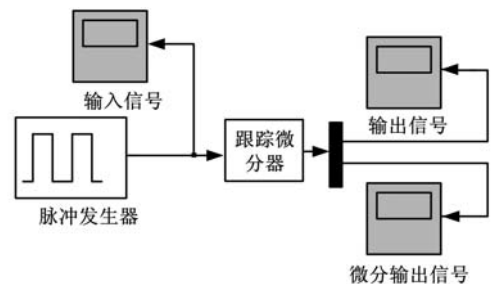


图 3 跟踪微分器仿真模型

图 4 所示为使用跟踪微分器对阶跃信号 $v_0 = 1$ 进行跟踪的仿真效果。图 5 所示为对频率为 1kHz、幅值从 1 到 -1 变化的方波信号进行跟踪的仿真效果。由图 4 和图 5 可以看出,跟踪微分器可以实现对输入信号快速且无超调的跟踪。

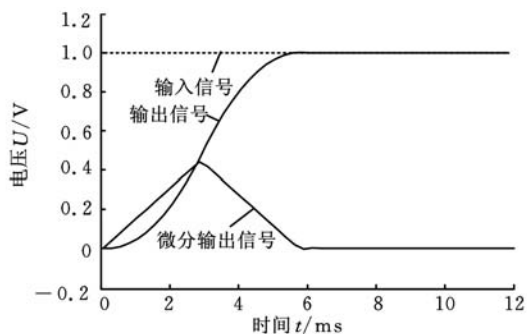


图 4 阶跃信号 $v_0=1$ 跟踪仿真结果

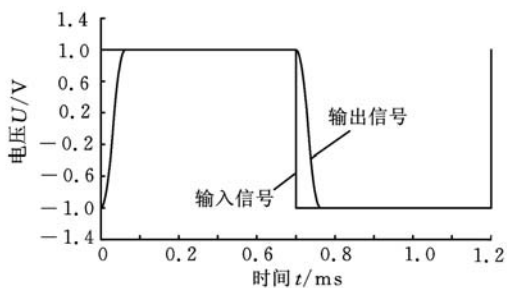


图 5 方波信号跟踪仿真结果

5 实验结果

5.1 实验平台

为验证本文提出的采用跟踪微分器为电流指令安排过渡过程方法的有效性,设计了全数字永磁同步电主轴驱动系统实验平台。其中,控制电路采用 DSP&CPLD 的硬件结构,DSP 选用 TI 公司的 TMS320LF2812,主要负责控制算法的实现。CPLD 采用 ALTERA 公司的 EPM1270T144,主要是实现扩展 I/O 的功能。EPM1270T144 与 TMS320F2812 之间采用数据地址总线连接。电主轴采用西安英威腾合升动力科技有限公司生产的 HSB1500908,其电气参数如表 1 所示。

表 1 电主轴参数表

项目	参数值
额定电压(V)	310
额定电流(A)	14
额定功率(kW)	7.5
额定转速(r/min)	9000
最高转速(r/min)	18000
额定转矩(N·m)	8
极对数	2
线间反电势(V/S)	0.33
转子惯量(kg·m ²)	19.5×10^{-4}

5.2 实验结果

给定转速为 9000r/min,阶跃升速。图 6 ~ 图 8 为电主轴加速阶段 i_q 的局部放大图。在图 6 中,电流控制器采用了传统的 PI 调节器设计,可

以看到 q 轴电流在跟踪指令值的过程中有超调,跟踪误差较大,跟踪效果不好。图 7 中的电流控制器采用了积分分离设计的 PI 控制方法,相对于图 6 而言,积分分离的设计使 i_q 上升阶段的超调基本消失,但电流到达稳态的时间明显变长,接近 40ms。图 8 是在图 6 的基础上为 q 轴电流指令安排了过渡过程的情况,可以看到 q 轴电流对指令值实现了无超调跟踪,且跟踪时间相比图 7 明显缩短,与图 6 中的跟踪时间相差不大,且跟踪过程更平滑。

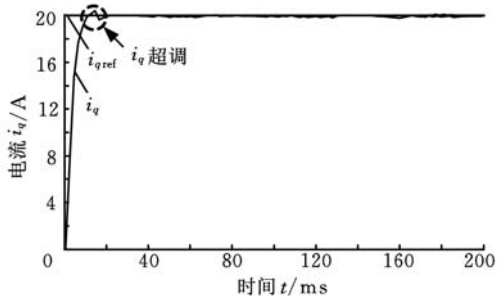


图 6 采用传统 PI 调节器的 q 轴电流指令值和实际值

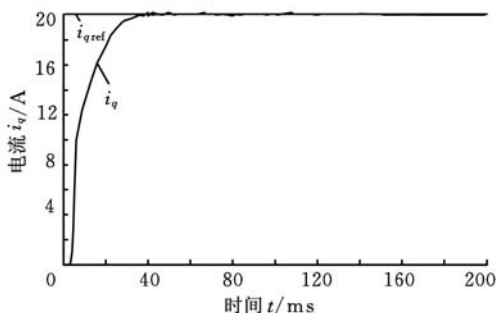


图 7 采用积分分离的 PI 调节器 q 轴电流指令值和实际值

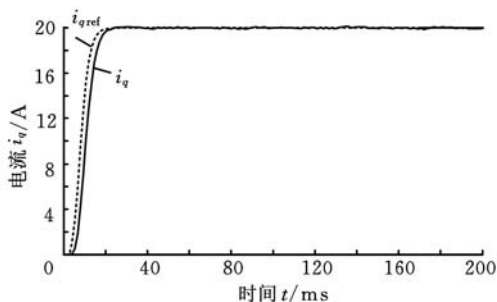


图 8 在传统 PI 调节器基础上安排了过渡过程的 q 轴电流指令值和实际值

永磁同步电主轴在基速以上运行时需要进行弱磁控制,此时弱磁控制器使 i_d 的指令值变为负值。图 9 ~ 图 11 所示分别为弱磁升速阶段 d 轴电流的指令值和实际值。同样,采用传统 PI 调节器的设计,图 9 中电主轴 d 轴实际电流在对指令值的跟踪阶段有超调。图 10 中采用了积分分离设计的 PI 控制方法,相对于图 9,虽然超调量明显减小,但是电流到达指令值的时间明显变长,动

态性能变差。在图 9 的基础上为 d 轴电流指令安排了过渡过程,如图 11 所示。与图 10 的对比可以看出,安排了过渡过程之后 d 轴实际电流可以实现对指令信号的无超调跟踪,跟踪时间与未安排过渡过程的时间基本相同,跟踪效果更好。所以,采用跟踪微分器安排过渡过程是解决系统“快速性”和“超调”之间矛盾的有效手段,可使 PI 调节器对阶跃信号的跟踪更加平滑,跟踪效果更好,同时使系统参数整定更为容易,增强了电流 PI 调节器的鲁棒性。

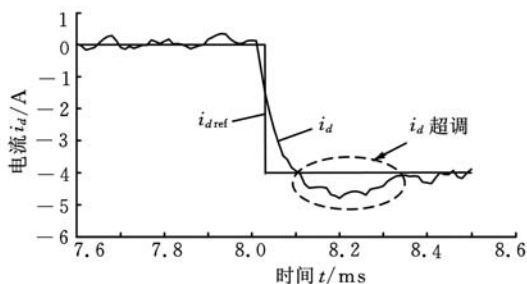


图 9 采用传统 PI 调节器的 d 轴电流指令值和实际值

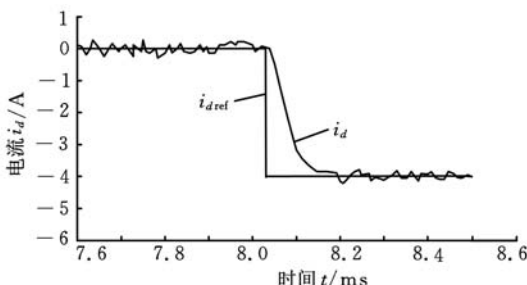


图 10 采用积分分离的 PI 调节器 d 轴电流指令值和实际值

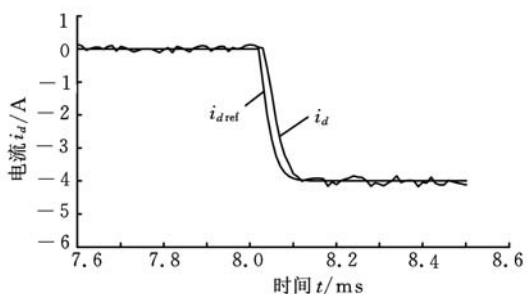


图 11 在传统 PI 调节器基础上安排了过渡过程的 d 轴电流指令值和实际值

6 结语

电流环是永磁同步电主轴驱动系统的核心环节,为了提高永磁同步电主轴的电流控制性能,本文首先指出控制的“快速性”和“超调”之间的矛盾是 PI 调节器的固有属性,这对矛盾增加了 PI 参数的整定难度,降低了系统的鲁棒性。针对电流 PI 调节器存在的阶跃响应超调与跟踪速度之间

的矛盾,提出了采用跟踪微分器为电流指令安排过渡过程的方法,实现了对电流指令无超调的跟踪,相对于采用积分分离设计的 PI 调节器,跟踪时间更短,跟踪过程更平滑,同时使系统参数整定更为容易,增强了电流控制的鲁棒性。仿真和实验结果验证了方法的有效性。

参考文献:

- [1] 张伯霖,夏红梅,黄晓明,等.超数控机床高速化的研究与应用[J].中国机械工程,2001,12(10):1132-1137.
Zhang Bolin, Xia Hongmei, Huang Xiaoming. Research and Application of High Speed CNC Machine Tools[J]. China Mechanical Engineering, 2001, 12 (10):1132-1137.
- [2] 蒋学程,彭侠夫.小转动惯量 PMSM 电流环二自由度内模控制[J].电机与控制学报,2011,15(8):69-74.
Jiang Xuecheng, Peng Xiafu. Two - degree - freedom Internal Model Control for Current Loop of Small Rotational Inertia PMSM[J]. Electric Machines and Control, 2011, 15(8):69-74.
- [3] 杨明,牛里,王宏佳,等.微小转动惯量永磁同步电机电流环动态特性的研究[J].电机与控制学报,2009,13(6):844-849.
Yang Ming, Niu Li, Wang Hongjia, et al. Research on Dynamic Response of the Current Loop for PMSM with Small Inertia[J]. Electric Machines and Control, 2009, 13(6):844-849.
- [4] Mattavelli P, Tubiana L, Zigliotto M. Torque - ripple Reduction in PMSM Drives Using Repetitive Current Control[J]. IEEE Trans. on Power Electronics, 2005, 20(6):1423-1431.
- [5] Yang Shengming, Lee Chenaur. A Deadbeat Current Controller for Field Oriented Induction Motor Drives[J]. IEEE Trans. on Power Electronics, 2002, 17(5):772-778.
- [6] Kadjoudj M, Benbouzid M E H, Ghennai C, et al. A Robust Hybrid Current Control for Permanent Magnet Synchronous Motor Drive[J]. IEEE Trans. on Energy Conversion, 2004, 19(1):109-113.
- [7] 于家斌,秦晓飞,郑军,等.一种改进型超前角弱磁控制算法[J].电机与控制学报,2012,16(3):101-106.
Yu Jiabin, Qin Xiaofei, Zheng Jun, et al. An Improved Leading Angle Flux Weakening Control Algorithm[J]. Electric Machines and Control, 2012, 16 (3):101-106.
- [8] 韩京清.自抗扰控制器及其应用[J].控制与决策,1998,

基于元码段可重构的事物编码系统研究

肖新华^{1,2} 王太勇¹ 成兵¹ 李煜¹

1. 天津大学机构理论与装备设计教育部重点实验室,天津,300072

2. 天津工业大学,天津,300387

摘要:为了适应复杂多变的编码规则,统一和共享码段信息资源,提出了元码段的概念及其细分方法,分析了元码段的类型。阐述了基于元码段细分和元码段重构的混合式编码规则定义方法,分析了基于该方法的编码系统功能。对元码段实现方法、数据库设计、PDM 系统集成模型等关键技术进行了研究。实例表明该方法支持定义复杂的编码规则,重用码段数据,可降低编码系统开发和维护成本。

关键词:元码段;细分;可重构;编码系统;PDM 集成

中图分类号:TP391;TH166

DOI:10.3969/j.issn.1004-132X.2014.02.011

Research on Coding System Based on Coding Segment Elements Reconfigurable Method

Xiao Xinhua^{1,2} Wang Taiyong¹ Cheng Bing¹ Li Yu¹

1. Key Lab of Mechanism Theory and Equipment Design of Ministry of Education, Tianjin University, Tianjin, 300072

2. Tianjin Polytechnic University, Tianjin, 300387

Abstract: In order to customize complex coding rules and to share coding segments, a concept of CSE was put forward. The subdivision method and types of CSE were presented. After studying the coding rule definition method based on CSE recomposing, the coding system functions were described. The key techniques such as CSE realization method, database design and PDM integration model were researched. Cases show that the method can support complex coding rules definition and reuse CSE data, therefore the cost of development and maintenance of coding system is reduced.

Key words: coding segment element(CSE); subdivision; reconfigurable; coding system; PDM integration

0 引言

PDM 是用来管理产品相关数据和动态过程

的技术^[1]。在 PDM 系统实施过程中,需要对物料、图纸、工艺文件、各种单据报表进行编码,以便于管理。因此,事物编码是企业信息化的前提条件,也是系统集成的关键。陈兵奎等^[2]应用成组技术原理,提出了融合相似结构—工艺的齿轮分类编码方法,并开发了计算机辅助齿轮分类编码系统。Pan^[3]分析了影响建筑企业物料智能识别

收稿日期:2012—08—14

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50975193);国家科技重大专项(2009ZX04014-101);高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20100032110006);天津市科技支撑重点项目(12ZCZDGX01600);福建省科技计划重点项目(2012H1008)

13(1):19-23.

Han Jingqing. The Auto - disturbance Rejection Controller and Its Application[J]. Control and Decision, 1998, 13(1): 19-23.

[9] 邵立伟,廖晓钟,张宇河,等.自抗扰控制器在永磁同步电机控制中的应用[J].北京理工大学学报, 2006, 26(4): 326-329.

Shao Liwei, Liao Xiaozhong, Zang Yuhe, et al. Active Disturbance Rejection Controller Scheme for Permanent Magnetic Synchronous Motor[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2006, 26(4): 326-329.

[10] 郭绪阳,祁李辉,田李庄.基于积分分离 PID 控制的交流伺服系统[J].现代电子技术, 2007, 19: 163-164.

Guo Xuyang, Qi Xiaohui, Tian Lizhuang. AC Servo System Based on Integral Partition PID Control [J]. Modern Electronic Technology, 2007, 19: 163-164.

[11] 韩京清.自抗扰控制技术[J].前沿科学, 2007, 1(1): 24-31.

Han Jingqing. Active Disturbance Rejection Control[J]. Frontier Science, 2007, 1(1): 24-31.

(编辑 苏卫国)

作者简介:于家斌,男,1984年生。北京工商大学计算机与信息工程学院讲师、博士。主要研究方向为电机驱动关键技术。
王小艺,男,1975年生。北京工商大学计算机与信息工程学院副教授、博士。
许继平,男,1979年生。北京工商大学计算机与信息工程学院副教授、博士。
秦晓飞,男,1982年生。中国科学院自动化研究所助理研究员、博士。