

2-D 数字阀用低惯量旋转电磁铁及其矩角特性研究^{*}

孟 彬 阮 健 李 胜

(浙江工业大学特种装备制造与先进加工技术教育部重点实验室, 杭州 310014)

【摘要】 针对传统 2-D 数字阀用电-机械转换器转动惯量大、动态响应低的不足,研制了一种空心杯转子结构的低惯量旋转电磁铁。通过磁路解析讨论了电磁铁结构和运行参数对输出力矩的影响;基于 Ansoft/Maxwell 3-D 平台对其矩角特性进行了有限元模拟。试验结果和仿真结果基本一致,该低惯量旋转电磁铁具有较大的静力矩,其矩角特性近似于正弦波形,可用作高频 2-D 数字阀的电-机械转换器。

关键词: 2-D 数字阀 矩角特性 旋转电磁铁 低惯量

中图分类号: TH137.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2011)12-0220-05

Low Inertia Rotary Electromagnet of 2-D Digital Valve and Research on Its Torque-angle Characteristic

Meng Bin Ruan Jian Li Sheng

(Key Laboratory of Special Purpose Equipment and Advanced Processing Technology, Ministry of Education, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China)

Abstract

Since conventional electro-mechanical converter of 2-D digital valve had limitations of large inertia and low dynamic response, a low inertia rotary electromagnet with coreless rotor structure was proposed. Based on magnetic circuit approach, the influence of key structure and operating parameters on the output torque of electromagnet was discussed firstly. Then the finite element simulation of torque-angle characteristic was performed on the platform of Ansoft/Maxwell 3-D. The experimental results were in a close agreement with the simulated results. The low inertia rotary electromagnet had large static torque and its torque-angle characteristic was close to sinusoidal waveform, which would be used as electro-mechanical converter of 2-D digital valve with high frequency response.

Key words 2-D digital valve, Torque-angle characteristic, Rotary electromagnet, Low inertia

引言

近年来,利用伺服螺旋机构原理工作的 2-D 数字阀因具有结构简单、响应速度快、精度高、抗污染能力强等优点,而在金属材料试验机、地震模拟震动台以及相关航空航天领域得到了广泛应用^[1-3]。电-机械转换器作为电液比例/伺服阀的关键部件,其功能是将输入电信号转换成相应的输出力/力矩以驱动阀芯作相应的滑动或转动,因而在性能方面要

求其在保证一定输出力/力矩的同时,尽量具有较高的动态响应^[4-7]。传统的 2-D 数字阀的电-机械转换器一般采用商用混合式步进电动机,其转子采用实心硅钢片叠压而成,磁导率低、转动惯量大,导致电-机械转换器动态响应低,从而降低了阀以至整个电液伺服系统的频宽^[8],限制了对于需要高动态响应的场合的应用。为此本文提出一种空心杯转子结构的低惯量旋转电磁铁,制作物理样机,并基于磁路解析和磁场有限元模拟的方式建立数学模型,通过

收稿日期: 2010-12-15 修回日期: 2011-01-19

^{*} 国家自然科学基金资助项目(50975258)、浙江省自然科学基金资助项目(Y1100346)、浙江大学流体传动及控制国家重点实验室开放基金资助项目(GZKF-2008005)和浙江省机械电子工程重中之重开放基金资助项目(2009EP009)

作者简介: 孟彬,讲师,博士生,主要从事电液直接数字控制研究,E-mail: solidwe@gmail.com

通讯作者: 阮健,教授,博士生导师,主要从事新型流体控制元件及电液直接数字控制研究,E-mail: wxmin@mail.hz.zj.edu.cn

仿真和试验探讨其静态矩角特性。

1 结构及工作原理

旋转电磁铁主要由转轴、转子、定子、壳体、永磁体和隔磁环等组成,如图 1、2 所示。转子部件主要由两段铁心 I 和 II 以及夹在其中的永磁体构成,永磁体沿轴向充磁, I、II 两段铁心上都均匀分布 50 个小齿,两段铁心上的小齿相互错位半个齿;定子上均匀分布有 8 个大齿,每个大齿上均匀分布 5 个小齿。大齿的根部安装有线圈并以串联或并联的方式连接形成两相绕组,即定子大齿 1、3、5、7 为一相绕组,定子大齿 2、4、6、8 为另一相绕组。

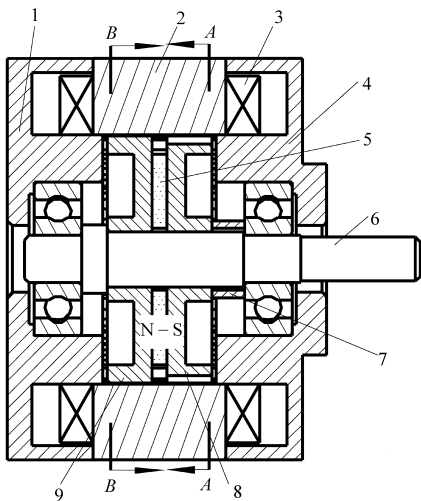


图 1 旋转电磁铁轴向剖视图

Fig.1 Axial section view of rotary electromagnet

1. 后端盖 2. 定子 3. 控制线圈 4. 前端盖 5. 永磁体 6. 转轴 7. 隔磁环 8. 转子铁芯 I 9. 转子铁芯 II

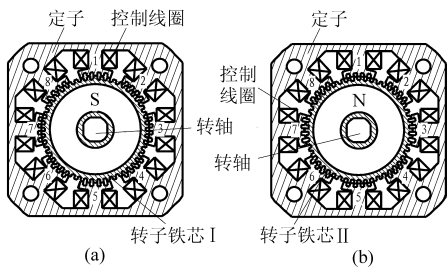


图 2 旋转电磁铁径向剖面图

Fig.2 Radial section view of rotary electromagnet

(a) S 极剖面图 (b) N 极剖面图

为减小转动惯量、获得高动态响应,两段铁心被做成空心杯的形式分别安置在永磁体的两侧。为了提高工作气隙下的磁通密度,增大电磁铁的输出力矩,定、转子材料采用了高磁导率的铁镍合金 1J50,而永磁体选用高磁能积的稀土永磁材料钕铁硼 N45。为了得到高磁导率,1J50 必须要进行严格的高温退火,且退火后不能再次机械加工,以免磁性能

恶化。

为兼顾高定位精度与高动态响应,对旋转电磁铁采用连续跟踪控制的方法^[9],如图 3 所示。工作时在电磁铁两相绕组中通入相位差为 90°的正弦波电流,便会形成圆形的旋转磁场矢量,在工作过程中电磁铁转子的角位移 θ 、旋转磁场的角位移 θ_m 和旋转磁场角位移的控制信号 θ_{mc} 保持着跟踪关系。旋转磁场的角位移 θ_m 发生变化,将对转子产生一个电磁力矩驱动其转到由转子齿和定子齿的相对位置所确定的最大磁导位置。因而连续控制旋转磁场的角位移 θ_m 便可实现对转子角位移 θ 的连续控制。

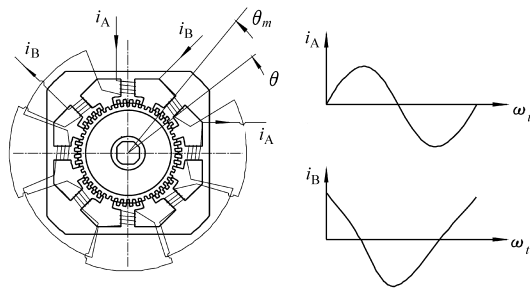


图 3 连续跟踪控制原理示意图

Fig.3 Schematic of principle of continuous tracking control

2 数学建模及仿真

2.1 矩角特性

2-D 数字阀用电-机械转换器的矩角特性是指在不改变控制绕组通电状态,也就是一相或几相控制绕组通直流电时,输出电磁转矩与失调角的关系^[10~12]。矩角特性的表征主要有两项:一是矩角特性上转矩的最大值,称为最大静转矩;二是其本身波形。矩角特性作为电-机械转换器的主要特性之一,在很大程度上决定了其静态动态运行性能。

2.2 磁路分析

为获得电磁铁的静态解析方程,分析其关键结构和运行参数对矩角特性的影响,采用等效磁路法对电磁铁进行建模分析。假设系统中的铁磁材料工作在线性区,定转子铁芯磁导率为无穷大,可认为磁路中的磁压降就主要集中在工作气隙上。基于以上假设并考虑电磁铁的结构和磁路对称性,可得到旋转电磁铁在永磁体单独励磁时的 1/4 等效磁路图,如图 4 所示。图中, F_c 为等效磁动势, Λ_m 为磁导, Λ_σ 为漏磁导, Φ_g 为有效工作磁通, Φ_σ 为漏磁通, Φ_m 为总磁通。

假定定子电枢极下的气隙磁导均可由富氏级数分解成各次谐波分量,忽略高次谐波分量并取 a 极下齿对齿 $\theta_e = 0$ 时的位置,有

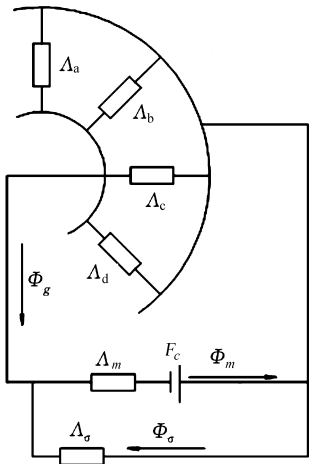


图 4 永磁体单独励磁时的 1/4 等效磁路图
Fig. 4 1/4 equivalent magnetic circuit with excitation of permanent magnet

$$\begin{cases} \Lambda_a = \Lambda_0 + \Lambda_1 \cos \theta_e \\ \Lambda_b = \Lambda_0 + \Lambda_1 \cos \left(\theta_e - \frac{\pi}{2} \right) \\ \Lambda_c = \Lambda_0 + \Lambda_1 \cos \left(\theta_e - \pi \right) \\ \Lambda_d = \Lambda_0 + \Lambda_1 \cos \left(\theta_e - \frac{3\pi}{2} \right) \end{cases} \quad (1)$$

式中 Λ_0 ——气隙磁导的恒定分量
 Λ_1 ——气隙磁导的基波分量幅值
 θ_e ——定转子齿中心线夹角的电角度
 Λ_i ——第 $a \sim d$ 极下的气隙磁导, i 为 $a \sim d$

在线性条件下,只要分别求出永磁体磁势在定子中产生的磁共能和定子励磁磁势在永磁体中产生的磁共能,得到总磁共能后对转子转角求导,便可得到电磁铁的输出转矩。

由图 4 可以得到电磁铁第 $a \sim d$ 极内的磁通分别为

$$\Phi_i = \frac{\Phi_g}{4k_\sigma \Lambda_0} \Lambda_i \quad (2)$$

其中
$$k_\sigma = \frac{4\Lambda_0 + \Lambda_\sigma}{\Lambda_g} \quad (3)$$

式中 Φ_i ——第 $a \sim d$ 极内的磁通, i 为 $a \sim d$
 k_σ ——漏磁系数

永磁体对绕组匝数为 N 的定子 A 相和 B 相产生的互磁链 Ψ_A 和 Ψ_B 分别为

$$\begin{cases} \Psi_A = 4N(\Phi_a - \Phi_c) = \frac{2N\Phi_g \Lambda_1 \cos \theta_e}{k_\sigma \Lambda_\sigma} \\ \Psi_B = 4N(\Phi_b - \Phi_d) = \frac{2N\Phi_g \Lambda_1 \sin \theta_e}{k_\sigma \Lambda_\sigma} \end{cases} \quad (4)$$

令永磁体在定子中产生的磁共能为 w'_{12} , 有

$$w'_{12} = \frac{i_A \Psi_A + i_B \Psi_B}{2} = \frac{N\Lambda_1 \Phi_g (i_A \cos \theta_e + i_B \sin \theta_e)}{k_\sigma \Lambda_0} \quad (5)$$

式中 i_A, i_B ——定子 A 相和 B 相绕组电流

要求得定子励磁磁势在永磁体中产生的磁共能,可令含有永磁体的支路开路,据此作出仅有二相绕组通电时的等效磁路图及永磁体状态图,如图 5 和图 6 所示。

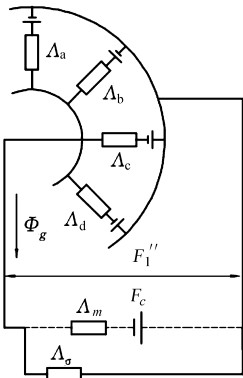


图 5 两相绕组通电时的 1/4 等效磁路图
Fig. 5 1/4 equivalent magnetic circuit with excitation of two phase currents

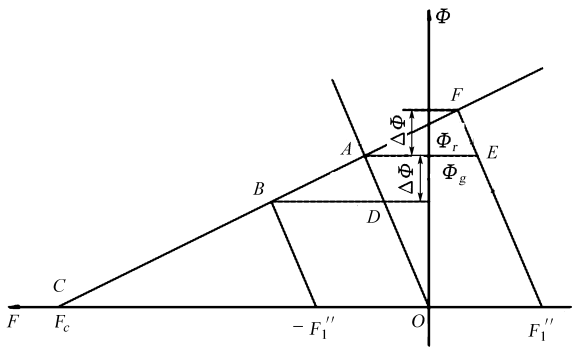


图 6 两相绕组通电时的永磁体状态图
Fig. 6 State diagram of permanent magnet with excitation of two phase current

令 F''_1 为定子绕组磁势在永磁体两端产生的等值磁势,有

$$F''_1 = \frac{N\Lambda_1 (i_A \cos \theta_e + i_B \sin \theta_e)}{2k_\sigma \Lambda_0} \quad (6)$$

设 F''_1 在永磁体中产生的磁通为 $\Delta\Phi$,考虑到图 6 中 $\triangle OAC$ 、 $\triangle ADB$ 与 $\triangle FEA$ 之间的相似关系,则整个永磁体磁共能的增量 w'_{21} 为

$$\begin{aligned} w'_{21} &= 2\Delta\Phi F_c = 2F''_1 \Phi_g = \\ &= \frac{N\Lambda_1 \Phi_g (i_A \cos \theta_e + i_B \sin \theta_e)}{k_\sigma \Lambda_0} \end{aligned} \quad (7)$$

整个电磁铁的电磁转矩 T 为

$$T = \frac{\partial (w'_{12} + w'_{21})}{\partial \theta} = T_m \sin \lambda \quad (8)$$

其中

$$T_m = -\frac{2N\Lambda_1 Z_r \Phi_g}{k_\sigma \Lambda_\sigma} \sqrt{i_A^2 + i_B^2} \quad (9)$$

$$\lambda = \theta - \theta_m \quad (10)$$

式中 Z_r ——电磁铁转子齿数

T_m ——静力矩幅值 λ ——失调角

由式(8)可知,静力矩幅值 T_m 和绕组电流、转子齿数、线圈匝数、永磁体有效工作磁通以及气隙磁导的基波分量幅值等结构和运行参数有关。当转子偏离平衡位置 $\pi/2$ 时,其输出静力矩最大;当偏离 π 时,即半个转子齿距时,力矩值最小,此时,转子处于不稳定状态,易发生失步现象。因此,为了保证电磁铁不失步,应将旋转磁场的角位移 θ_m 与电磁铁转子的角位移 θ 之差控制在半个转子齿距之内,失调角的称谓也由此而来。

2.3 电磁场有限元模拟

为得到较为精确的矩角特性值,对旋转电磁铁基于 Ansoft/Maxwell 3-D 平台作三维静磁场的模拟。表 1 为旋转电磁铁用于有限元模拟的一些主要结构和运行参数。永磁体钕铁硼 N45 的剩磁和矫顽力等参数来自供货厂家提供的数据,而 1J50 的初始磁化曲线委托上海亨磁公司实测得出。图 7 所示为 Maxwell 3-D 平台下建立的旋转电磁铁有限元模型。

表 1 旋转电磁铁的主要结构和运行参数
Tab.1 Key structure and operating parameters
of rotary electromagnet

参数	数值
转子齿数 Z_r	50
定子极数 P_s	8
定子每极齿数 Z_s	5
空心杯转子壁厚 H_r/mm	2.2
单边定转子气隙 g/mm	0.1
空心杯转子转动惯量 $J_r/\text{kJ} \cdot \text{m}^2$	0.000 002 7
定转子齿距 t/mm	1.62
定转子齿高 H_t/mm	0.80
转子外径 D_r/mm	25.80
绕组线圈匝数 N	45
永磁体矫顽力 $H_c/\text{kA} \cdot \text{m}^{-1}$	876
永磁体最大磁能积 $(HB)/\text{kJ} \cdot \text{m}^{-3}$	358
永磁体剩余磁感应强度 B_r/T	1.3

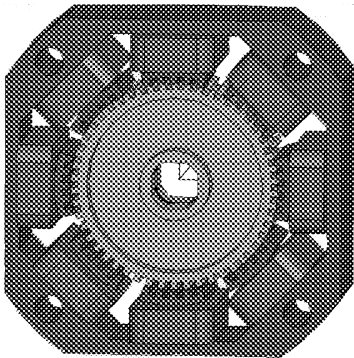


图 7 三维有限元模型

Fig.7 3-D finite element model

图 8 所示为在绕组电流分别为 0.5、1.5、2.5 和 3.5 A 下,模拟得到的电磁铁在一个齿距角范围内的矩角特性曲线,其对应的最大静力矩分别为 0.05、0.08、0.10 和 0.11 N·m 左右。在绕组电流较小时由于高次谐波的影响,矩角特性波形有轻微的下凹点存在,随着电流增大,高次谐波对矩角特性的影响开始减小。另外由于磁路饱和的影响,当电流增加到一定幅度后,静力矩的增长开始放缓。可以看到,除了对应静力矩幅值的位置稍微有点偏离外,有限元模拟的矩角特性波形大体呈正弦波形,这与上述的线性解析分析结果是基本一致的。

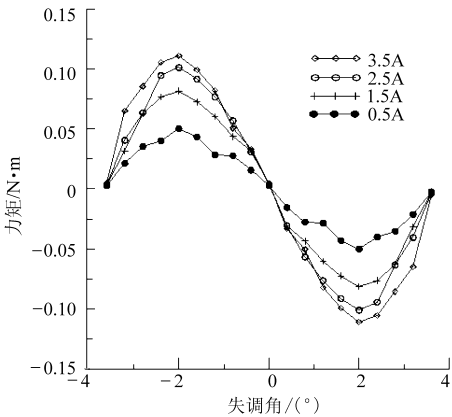


图 8 有限元模拟的矩角特性

Fig.8 FEM simulated torque-angle characteristics

3 试验研究

为了验证理论分析的结果,对低惯量旋转电磁铁搭建如图 9 所示的矩角特性测试系统。旋转电磁

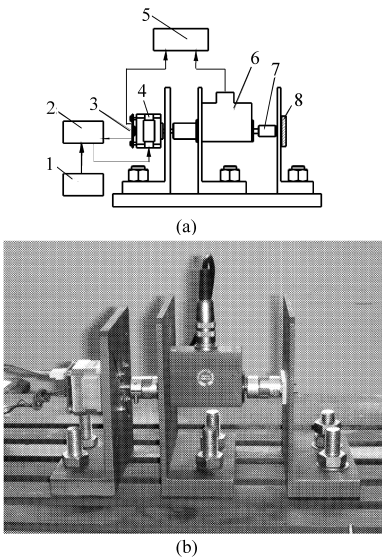


图 9 矩角特性测试系统

Fig.9 Experimental system for torque-angle characteristics

(a) 示意图 (b) 实物图

1. 计算机 2. 控制器 3. 角位移传感器 4. 旋转电磁铁 5. 记录仪示波器 6. 扭矩传感器 7. 联轴器 8. 固定块

铁通过联轴器与扭矩传感器输入轴相连,扭矩传感器输出轴则通过联轴器与固定块相连。专用的电磁铁控制器通过连续跟踪控制算法控制 A 相和 B 相电流的大小,从而得到所需要的旋转磁场角位移 θ_m ;而电磁铁转子的实际角位移 θ 则由固连在电磁铁后端的角位移传感器测出,两者之间的差值 $\theta - \theta_m$ 就是失调角 λ 的值。测试时电磁铁的转子轴连接到固定块,则转子角位移 θ 恒为零,控制器通过改变两相电流改变旋转磁场角位移的大小以得到失调角的值,对应的输出力矩值则由扭矩传感器测出,两路数据送入记忆示波器后便可得到矩角特性的试验结果。

图 10 所示为绕组电流分别为 0.5、1.5、2.5 和 3.5 A 的情况下,试验得到的旋转电磁铁矩角特性,其对应的最大静力矩分别达到 0.038、0.071、0.082 和 0.090 N·m 左右,试验结果和仿真结果基本吻合。试验得到的最大静力矩值略微偏低,这可能是由于电磁铁定转子之间气隙较小,而 1J50 的高温退火热处理通常被安排在最后以免磁性能恶化,从而

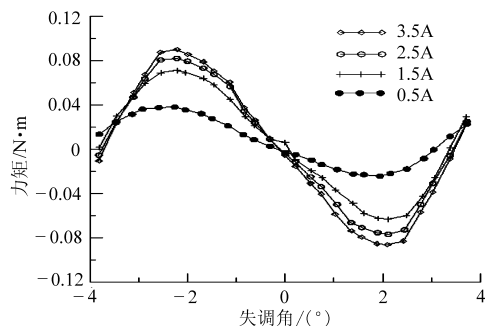


图 10 试验得到的矩角特性

Fig. 10 Experimental torque-angle characteristics

定转子在热处理后不可避免的会发生变形,加之本身固有的加工精度误差,导致两者之间有时会存在轻微的摩擦接触,使得输出的静力矩值下降。

另外,受到电磁铁定转子齿齿形的加工精度限制,以及联轴器和电磁铁转子轴、联轴器和扭矩传感器输入输出轴等各处连接存在间隙,加之扭矩传感器轴受力存在微小的扭转变形,使得测试过程中转子角位移 θ 并不总是恒为零,从而导致因失调角 λ 的测量误差而引起静力矩幅值的位置偏离以及零位两边波形的轻微不对称等。

3 结论

(1) 提出了一种空心杯转子结构的 2-D 数字阀用低惯量旋转电磁铁,试验结果和有限元模拟结果基本吻合,表明该旋转电磁铁具有较大的静力矩,其矩角特性近似于正弦波形,可用作高频 2-D 数字阀的电-机械转换器。

(2) 从旋转电磁铁的静态力矩解析式可以看到,在保持机座尺寸和激励源大小不变的情况下,增加转子齿数以及对定转子的齿形和结构尺寸进行优化,都是进一步光滑矩角特性波形,提高静力矩的有效途径。

(3) 由于旋转电磁铁是以磁场作为电能和机械能的交换介质,气隙过大会使得过多的磁场能量储存在气隙中,其结果是减小了输出力矩,降低了电磁铁的动态响应。在本研究中为了降低加工和装配难度以及 1J50 热处理带来的定转子变形,定转子的气隙定为 0.1 mm。如能进一步提高加工精度,减小气隙,电磁铁的输出力矩可望进一步提高。

参 考 文 献

- 阮健,裴翔,李胜. 2-D 电液数字换向阀[J]. 机械工程学报,2000,36(3):86~89.
Ruan Jian, Pei Xiang, Li Sheng. 2-D digital directional control valve[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2000, 36(3):86~89. (in Chinese)
- Ruan Jian, Li Sheng, Pei Xiang, et al. 2-D digital simplified servo valve [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2004,17(2):311~314.
- 阮健,李胜,裴翔,等. 数字阀的分级控制及非线性[J]. 机械工程学报,2005,41(11):91~97.
Ruan Jian, Li Sheng, Pei Xiang, et al. Stage control and nonlinearities of digital valves[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2005,41(11):91~97. (in Chinese)
- 李勇,丁凡,满军,等. 线性力马达低功耗设计方案研究[J]. 兵工学报,2009,30(6):803~807.
Li Yong, Ding Fan, Man Jun, et al. Research on the method of low-power consumption design for linear force motor[J]. Acta Armamentar, 2009, 30(6):803~807. (in Chinese)
- 李其朋. 直动式电液伺服阀关键技术的研究[D]. 杭州:浙江大学,2005.
Li Qipeng. Research on the key technologies of direct drive servo valve[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2005. (in Chinese)
- 崔剑,丁凡,李其朋,等. 电液伺服转阀耐高压双向旋转比例电磁铁[J]. 机械工程学报,2008,44(9):230~235.
Cui Jian, Ding Fan, Li Qipeng, et al. High-pressure bi-directional rotary propotional solenoid for rotary servo valve[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2008,44(9):230~235. (in Chinese)

5 结束语

以模板技术为基础,给出了特征截面线的统一 NURBS 显式解析表示,精确表示出了由特定几何参数表示的工艺补充截面特征,并在此基础上提出了

截面线的编辑策略及相应的优化算法,该方法有利于形成规范的用户操作习惯,减少了用户的重复设计次数,同时避免了异常现象的发生,使得软件鲁棒性更强。

参 考 文 献

1 Chi Dy, Liu Ruijun, Hu Ping, et al. Smoothing parametric method to design addendum surface[C]//Proceedings of the 2008 International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation, 2008,1: 1 140 ~ 1 144.

2 姚兴,陈军,石晓祥,等. 覆盖件拉延模工艺补充面及压料面参数化设计研究[J]. 模具技术,2002(4):6~9.
Yao Xing, Chen Jun, Shi Xiaoxiang, et al. Addendum and binder surface parametric design for automotive panel drawing die [J]. Die and Mould Technology, 2002(4):6~9. (in Chinese)

3 刘细芬,黄华艳,张洪锐. 基于 CAE 技术的汽车覆盖件拉延模具设计[J]. 机械设计与制造,2010(4):242~244.
Liu Xifen, Huang Huayan, Zhang Hongrui. Die design of drawing for the automobile panel based on CAE technology[J]. Machinery Design and Manufacture, 2010(4):242~244. (in Chinese)

4 陈涛,李光耀. 覆盖件拉延模工艺补充及压料面的参数化设计新方法[J]. 机械工程学报,2006,42(5):69~74.
Chen Tao, Li Guangyao. New method on parametric design of addendum binder surface and drawing process complementary for automotive panel drawing die[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2006, 42(5):69~74. (in Chinese)

5 王伟,施法中. 覆盖件拉延模型工艺补充部分的参数化设计[J]. 锻压技术,2007,3(2):105~109.
Wang Wei, Shi Fazhong. Process addendum's parametric design in panel drawing die modeling[J]. Forging and Stamping Technology, 2007, 3(2):105~109. (in Chinese)

6 Piegl L A, Tiller W. The NURBS book[M]. 2nd ed. Berlin: Springer-Verlag, 1996.

7 Ortega J M, Rheinboldt W C. 多元非线性方程组迭代解法[M]. 朱季泽,译. 北京:中国科学出版社,1983.

8 杨晓红,张邦成. 汽车覆盖件拉深模具结构设计模板化 CAD 系统[J]. 农业机械学报,2007,38(11):149~152.
Yang Xiaohong, Zhang Bangcheng. Stencil CAD system of auto panel die drawing and extending mould structure design[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007, 38(11): 149~152. (in Chinese)

(上接第 224 页)

7 崔剑,丁凡,李其朋,等. 耐高压双向旋转比例电磁铁的静态力矩特性[J]. 浙江大学学报:工学版,2007,41(9): 1 578 ~ 1 581.
Cui Jian, Ding Fan, Li Qipeng, et al. Static torque characteristics of high-pressure bidirectional rotary proportional solenoid [J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science, 2007, 41(9):1 578 ~ 1 581. (in Chinese)

8 雷天觉. 新编液压工程手册[M]. 北京:北京理工大学出版社,1998:1 353 ~ 1 380.

9 阮健. 电液直接数字控制技术[M]. 杭州:浙江大学出版社,2000:218 ~ 228.

10 王宗培. 步进电动机[M]. 北京:科学出版社,1979:68 ~ 71.

11 邹继斌,李巍,李勇. 爪极式单相永磁步进电机特性的数值计算与分析[J]. 电工技术学报,2007,22(10):1~5.
Zou Jibin, Li Wei, Li Yong. Calculation and analysis of single phase stepper motor with claw poles [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2007, 22(10):1~5. (in Chinese)

12 满军,丁凡,李其朋,等. 圆锥和平面形磁极高速电磁铁动态特性对比[J]. 农业机械学报,2009,40(3):213~217.
Man Jun, Ding Fan, Li Qipeng, et al. Comparative researches on high-speed solenoids of conical pole and planar pole[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009,40(3):213~217. (in Chinese)