DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.12.043

阀用耐高压旋转电磁铁特性研究*

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】 设计了一种轴向分相结构的耐高压旋转电磁铁,通过磁路解析、数值仿真和实验研究讨论了电磁铁的矩角特性曲线以及频响和阶跃响应等静动态特性,其仿真频宽约为115 Hz/-3 dB 和 80 Hz/-90°,上升时间约为15 ms。为了验证理论分析的正确性,搭建了静动态特性实验平台对其进行了实验研究。结果表明该电磁铁的矩角特性近似于正弦波形,其最大静转矩达到了0.19 N·m,实验频宽达到113 Hz/-3 dB 和 65 Hz/-90°,上升时间约为18 ms。实验结果和仿真结果基本吻合,可以用作直动式2-D 数字比例阀等的电-机械转换器。

关键词:电磁铁 耐高压 特性 阀 中图分类号:TH137.5 文献标识码:A 文章编号:1000-1298(2012)12-0240-06

Characteristics of Electromagnet with High Pressure Resistance for Valve

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

A rotary electromagnet with high pressure resistance based on axial stator division structure was proposed. Combined with the approaches of magnetic circuit analysis, numerical simulation and experimental study, the static and dynamic characteristics of electromagnet including torque-angle relationship, frequency response and step response were studied. The simulated frequency width was 115 Hz/-3 dB, 80 Hz/-90° approximately and the simulated rise time for step response was about 15 ms. In order to validate the accuracy of theoretical results, a special test rig was built and experimental study was performed. The electromagnet has sinusoidal-like torque-angle characteristics whose maximum static torque reached about 0.19 N \cdot m. And its experimental frequency width was 113 Hz/- 3 dB, 65 Hz/-90° approximately and experimental rise time was about 18 ms. The experimental results were in a close agreement with the simulated results. The electromagnet was appropriate to be used as the electro-mechanical converter of 2-D direct-drive digital proportional valve.

Key words Electromagnet, High pressure resistance, Characteristics, Valve

引言

在电液伺服/比例控制系统中,各种电液伺服/ 比例阀起着机电能量转换和信号放大作用,在很大 程度上对系统性能起到决定性的影响。而电-机械 转换器作为关键的驱动部件,其结构和静动态特性 对电液伺服/比例阀的性能有重大影响。阀用电-机 械转换器按照衔铁工作腔是否允许油液进入可以分 为干式和湿式两种,后者与前者相比,由于其结构上 的耐高压特性而可以取消干式结构固有的阀杆上的 动密封,提高了阀切换的可靠性;衔铁工作时可以浸 在油液中,油液会循环带走线圈的一部分热量,从而

收稿日期: 2012-04-21 修回日期: 2012-05-27

^{*}国家自然科学基金资助项目(50975258)和浙江省自然科学基金资助项目(Y1100346)

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,主要从事流体控制元件及电液直接数字控制研究,E-mail: wxmin@ mail. hz. zj. com

改善了散热效能,换向和复位时冲击噪声也较小,工 作平稳,使用寿命长。因此,具备湿式耐高压能力的 高性能电-机械转换器长期以来一直是业界的研究 重点和发展方向^[1-6]。

近年来,利用液压伺服螺旋机构原理工作的 2-D 阀由于结构简单、响应速度快、精度高、抗污染能力 强,视应用场合而定可构成 2-D 数字换向阀、2-D 数 字比例阀、2-D 数字伺服阀等从低端到高端的全系 列流体控制元件,因而在电液数字控制系统中得到 了广泛应用^[7~8]。2-D 阀的电-机械转换器一般选 用两相混合式步进电动机。然而混合式步进电动机 由于定子径向分相而不具备湿式耐高压能力,导致 其无法直接与 2-D 阀阀体相连而构成较为简单的直 动式 2-D 阀。本文提出一种轴向分相结构的耐高压 旋转电磁铁并制作物理样机,通过磁路解析、数值仿 真和实验研究讨论其静态矩角特性以及动态频率和 阶跃特性。

1 结构及工作原理

图1 所示为耐高压旋转电磁铁的结构示意图, 主要由转子部件、定子部件和端盖等组成。转子设 计成薄壁的空心杯形状以减小转动惯量,转子外圆 均布15 个小齿;定子由4 段轭铁构成,其内圆面也 均布数量与转子外圆相同的小齿,分左、右两组,分 别包容2 个励磁线圈构成电磁铁的A、B 两相;为实 现连续旋转,每相中的2 个轭铁各自错齿 1/2 的齿 距角,而后左、右两组定子铁芯再彼此错齿 1/4 的齿 距角;两组铁芯之间放置一稀土永磁体作为保持磁 场源。与传统的商用混合式步进电动机定子径向分 相的结构不同,该电磁铁采用了轴向分相的方式,即 将定子左、右两相分别置于永磁体的两边,如此设计 带来以下优点:

(1)轴向分相结构上可以采用 O 形密封圈对转子容腔进行密封,从而使得油液能够进入转子腔,使其成为湿式耐高压的电-机械转换器,将其直接与现有的 2-D 阀阀体相连而构成所谓的直动式 2-D 阀,不但简化了结构,而且可以取消阀杆上的动密封,从而减小了阀芯运动时的阻力,提高了可靠性。

(2)传统的径向分相结构由于绕制线圈的需要,定子各个大极之间要保持间隔,导致整个定子空间不能全部用来开齿,使得定子齿数少于转子齿数,引起部分输出力矩的损失;而轴向分相结构整个定子内圆周空间可全部用于开齿,从而增大电-机械转换器的输出力矩,同时也提升了动态性能。

为获得高定位精度和快速的动态响应,对耐高 压旋转电磁铁采用电流和转子角位移双闭环反馈控



图1 旋转电磁铁的结构简图

Fig. 1 Schematic of rotary electromagnet
1. 定子铁芯Ⅱ 2、4、8、12、14、16、19、21.0型密封圈 3、18.线
圈保持架 5. 端盖 6. 轴承 7. 转子轴 9. A 相控制线圈
10. 定子铁芯Ⅰ 11. 定子铁芯Ⅱ 13. 永磁体保持架 15. 永磁
体 17. B 相控制线圈 20. 转子 22. 定子铁芯Ⅳ

制的方法^[9]。永磁体所产生的保持磁场分别沿轴 向通过4段铁芯、定子与转子之间的气隙和转子壁 闭合,如图2所示工作时在定子两相中通入相位差 为90°的正弦波电流,其激励产生的磁场与永磁体 产生的固定磁场相互叠加,分别在4段铁芯与转子 之间的气隙中产生强弱交替变化的磁场,合成后产 生一个圆形的旋转磁场矢量驱动转子转动。在此过 程中转子的角位移、旋转磁场的角位移和旋转磁场 角位移的控制信号保持着跟踪关系。旋转磁场的角 位移发生变化,则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便可实现 对转子角位移的连续控制。



2 数学建模及仿真

2.1 矩角特性

一般而言,定转子双开齿式的电-机械转换器的 输出力矩主要由混合力矩、磁阻力矩和自定位力矩 叠加而成。混合力矩由永磁体和励磁电流磁势共同 产生,大小正比于电流磁势和永磁体磁势的乘积,其 力矩方向随电流方向而变化;磁阻力矩大小正比于 电流的平方,与电流方向无关;而所谓的自定位力矩 则是在定子线圈不通电状态下由永磁体单独励磁时 产生的转矩,大小正比于永磁体磁动势的平方,也与 电流方向无关。而所谓的矩角特性是指在一相或几 相控制绕组通直流电时,输出电磁转矩与失调角的 关系^[10]。矩角特性的表征主要体现在矩角特性上 转矩的最大值(称为最大静转矩)及其本身波形。 矩角特性作为电-机械转换器的主要特性之一,在很 大程度上决定其静动态运行性能。

2.2 磁路分析

采用等效磁路法进行建模分析,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(除特意考虑的附加气隙磁导外)。基于 以上假设可得到旋转电磁铁的等效磁路图,如 图 3a 所示。



图 3 旋转电磁铁的等效磁路图

Fig. 3 Equivalent magnetic circuit of rotary electromagnet
 (a)两相电流和永磁体同时励磁
 (b)A相电流单独励磁
 (c)永磁体单独励磁

假定4段铁芯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第1 极下齿对齿时为 $\theta_e = 0$ 的位置,根据4段铁芯之间 的相互错位关系,可以得出

$$\begin{cases} \Lambda_{a} = \Lambda_{0} + \Lambda_{1} \cos \theta_{e} \\ \Lambda_{b} = \Lambda_{0} - \Lambda_{1} \cos \theta_{e} \\ \Lambda_{e} = \Lambda_{0} - \Lambda_{1} \sin \theta_{e} \\ \Lambda_{d} = \Lambda_{0} + \Lambda_{1} \sin \theta_{e} \end{cases}$$
(1)
$$\begin{aligned} \text{ The } & \Lambda_{0} & \text{ The } \\ \Lambda_{i} & \text{ The } \\ \Lambda_{i} & \text{ The } \\ \text{ Charge in } & \text{ Charge in } \\ \text{ The } & \Lambda_{i} & \text{ The } \\ \text{ The } & \Lambda_{i} & \text{ The } \\ \text{ The } & \text{ The } \\ \ \text{ The } \\ \text{ The } & \text{ The } \\ \text{ The } & \text{ T$$

考虑由于旋转电磁铁的轴向分相而引起的磁路

不对称,可以将 a~d 极下的气隙磁导等效为

 $\begin{cases} \Lambda_{a}^{e} = \frac{\Lambda_{0}\Lambda_{s} + \Lambda_{1}\Lambda_{s}\cos\theta_{e}}{\Lambda_{0} + \Lambda_{s} + \Lambda_{1}\cos\theta_{e}} \\ \Lambda_{b}^{e} = \Lambda_{b} = \Lambda_{0} - \Lambda_{1}\cos\theta_{e} \\ \Lambda_{c}^{e} = \Lambda_{c} = \Lambda_{0} - \Lambda_{1}\sin\theta_{e} \\ \Lambda_{d}^{e} = \frac{\Lambda_{0}\Lambda_{s} + \Lambda_{1}\Lambda_{s}\sin\theta_{e}}{\Lambda_{0} + \Lambda_{s} + \Lambda_{1}\sin\theta_{e}} \end{cases}$ (2)

式中 1. ——考虑磁路不对称的附加气隙磁导

按照经典的电磁学理论,电磁力矩可以通过求 得系统总磁共能后对转子转角求导获得。在线性叠 加条件下,电磁铁的总磁共能为

$$w' = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{4} U_i^2 \frac{\Lambda_i^e}{\partial \theta}$$
(3)

式中 U_i —— $a \sim d$ 极下的总气隙磁压降, $i = a \sim d$

θ——转子输出角位移(机械角度)

因而转子的电磁力矩为

$$T = \frac{Z_r}{2} \sum_{i=1}^{4} U_i^2 \frac{\partial \Lambda_i^e}{\partial \theta_e}$$
(4)

式中 Z,——电磁铁转子齿数

在假设永磁体的磁导为无穷大的情况下,定子 左、右两相是解耦的,由此可作出 A 相电流单独励 磁时的等效磁路图,如图 3b 所示,B 相电流单独励 磁时的情况可依此类推,由此可得

$$\begin{cases} U_{ca} = \frac{\Lambda_b}{\Lambda_a^e + \Lambda_b} N i_a \\ U_{cb} = \frac{\Lambda_a^e}{\Lambda_a^e + \Lambda_b} N i_a \\ U_{cc} = \frac{\Lambda_d^e}{\Lambda_c + \Lambda_d^e} N i_b \\ U_{cd} = \frac{\Lambda_c}{\Lambda_c + \Lambda_d^e} N i_b \end{cases}$$
(5)

式中 N——定子绕组匝数

U_{ca}、<i>U_{cb}→*a* 和 *b* 气隙下的由 A 相励磁电流 引起的气隙磁压降

U_{cc}、U_{cd} — *c* 和 *d* 气隙下的由 B 相励磁电流 引起的气隙磁压降

当永磁体单独励磁时,如图 3c 所示,其分在定 子 A 相和 B 相上的磁压降可以写为

$$\begin{cases} U_{pm1} = F_c \frac{\Lambda_c + \Lambda_d^e}{\Lambda_a^e + \Lambda_b + \Lambda_c + \Lambda_d^e} \\ U_{pm2} = F_c \frac{\Lambda_a^e + \Lambda_b}{\Lambda_a^e + \Lambda_b + \Lambda_c + \Lambda_d^e} \end{cases}$$
(6)

式中 *F_e*——永磁体向外提供的等效磁动势则4段铁芯下的电磁力矩可依次写为

$$\begin{cases} T_1 = \frac{1}{2} U^2 \frac{\mathrm{d}\Lambda}{\mathrm{d}\theta} = \frac{1}{2} (U_{pm1} + U_{ca})^2 \frac{\mathrm{d}\Lambda_a^e}{\mathrm{d}\theta} \\ T_2 = \frac{1}{2} U^2 \frac{\mathrm{d}\Lambda}{\mathrm{d}\theta} = \frac{1}{2} (U_{pm1} - U_{cb})^2 \frac{\mathrm{d}\Lambda_b}{\mathrm{d}\theta} \\ T_3 = \frac{1}{2} U^2 \frac{\mathrm{d}\Lambda}{\mathrm{d}\theta} = \frac{1}{2} (U_{pm2} + U_{cc})^2 \frac{\mathrm{d}\Lambda_c}{\mathrm{d}\theta} \\ T_4 = \frac{1}{2} U^2 \frac{\mathrm{d}\Lambda}{\mathrm{d}\theta} = \frac{1}{2} (U_{pm2} - U_{cd})^2 \frac{\mathrm{d}\Lambda_d^e}{\mathrm{d}\theta} \end{cases}$$
(7)

将式(2)、(5)和(6)代入式(7)后化简,考虑到 在实际情况中 Λ_s 要远大于气隙磁导的基波分量幅 值 Λ_1 ,且 Λ_0 大于 Λ_1 ,可得到两相同时励磁条件下 电磁铁总的电磁力矩为

$$T = T_H + T_D \tag{8}$$

其中

$$T_{H} = -\frac{Z_{r}}{2}\Lambda_{1}F_{c}Ni_{a}\frac{\Lambda_{s}}{\Lambda_{s}+\Lambda_{0}}\left[\sin(Z_{r}\theta) + \cos(Z_{r}\theta)\right]$$
(9)

$$T_{D} = \left[\frac{Z_{r}}{8}\Lambda_{1}\sin\left(Z_{r}\theta\right)\frac{2\Lambda_{s}\Lambda_{0}+\Lambda_{0}^{2}}{\left(\Lambda_{s}+\Lambda_{0}\right)^{2}}-\frac{Z_{r}}{2}\Lambda_{1}\cos\left(Z_{r}\theta\right)\frac{2\Lambda_{s}\Lambda_{0}+\Lambda_{0}^{2}}{\left(\Lambda_{s}+\Lambda_{0}\right)^{2}}\right]F_{c}^{2}$$
(10)

式中 T_{μ} ——混合力矩 T_{p} ——自定位力矩 如果不考虑由于定子轴向分相而引起的磁路不 对称,也就是 A,趋向于无穷大时, $T_{p} = 0$ 。

由上述推导过程可知,旋转电磁铁产生的力矩 大小和绕组电流、转子齿数、线圈匝数、永磁体磁势 以及气隙磁导参数有关。由于定子左右两相错开了 1/4 的齿距角,彼此的磁阻力矩相互抵消,因此其可 看作由混合力矩 *T_u*和自定位力矩 *T_o*两部分叠加而 成,由于自定位力矩方向不随电流方向改变而改变, 在交流工作方式下,总的矩角特性波形会存在波形 不对称,其扭曲程度取决于电磁铁的具体结构和运 行参数。

耐高压旋转电磁铁的两相绕组电压平衡方程为

$$u_a = R_a i_a + L \frac{\mathrm{d}i_a}{\mathrm{d}t} - K_e \sin(N_r \theta) \frac{\mathrm{d}\theta}{\mathrm{d}t} \qquad (11)$$

$$u_{b} = R_{b}i_{b} + L\frac{\mathrm{d}i_{b}}{\mathrm{d}t} + K_{e}\cos(N_{r}\theta)\frac{\mathrm{d}\theta}{\mathrm{d}t} \qquad (12)$$

式中
$$u_a \ u_b$$
 — A、B 两相绕组电压
 $R_a \ R_b$ — A、B 两相绕组电阻
 L — 绕组电感
 K_e — 绕组的反电动势系数
令 $u_a = U_m \cos(N_r \theta_{mc})$ (13)
 $u_b = U_m \sin(N_r \theta_{mc})$ (14)
 $i_a = i_m \cos(N_r \theta_m)$ (15)

$$i_{\mu} = i_{\mu} \sin(N_{\mu} \theta_{\mu}) \tag{16}$$

其中

$$\theta_{mc} = \frac{1}{N_r} \arctan \frac{u_b}{u_a}$$

 $\theta_m = \frac{1}{N_r} \arctan \frac{\dot{i}_b}{\dot{i}_a}$
 $U_m = \sqrt{u_a^2 + u_b^2}$
 $i_m = \sqrt{\dot{i}_a^2 + \dot{i}_b^2}$
式中
 θ_{mc} —旋转磁场的控制信号
 θ_m —旋转磁场的角位移
 U_m —A、B两相绕组电压叠加后的幅值
 i_m —A、B两相绕组电流叠加后的幅值

将式(13)、(14)、(15)和(16)代入电压平衡方 程(11)和(12),则有

$$U_{m}\sin N_{r}(\theta_{mc} - \theta_{m}) =$$

$$LN_{r}i_{m}\frac{d\theta_{m}}{dt} + K_{e}\cos N_{r}(\theta_{m} - \theta)\frac{d\theta}{dt} \qquad (17)$$

$$U_{m}\cos N_{r}(\theta_{mc} - \theta_{m}) =$$

$$di \qquad d\theta$$

$$Ri_m + L\frac{\mathrm{d}i_m}{\mathrm{d}t} + K_e \sin N_r (\theta_m - \theta)\frac{\mathrm{d}\theta}{\mathrm{d}t} \qquad (18)$$

旋转电磁铁的转子动力学方程可以写成

$$T = J_r \frac{\mathrm{d}^2 \theta}{\mathrm{d}t^2} + B_e \frac{\mathrm{d}\theta}{\mathrm{d}t} + K_{\mathrm{L}}\theta + T_{\mathrm{L}}$$
(19)

式中 J, ——折算到转子上的转动惯量

B。——电磁铁的摩擦阻尼系数

K1——系统外加弹性刚度

T₁——负载转矩

式(8)、(17)、(18)和(19)构成了耐高压旋转电 磁铁的动态控制方程。基于上述动态控制方程,以不 同频率的正弦波为输入信号,且假设旋转磁场的角位 移 θ_m 与控制信号 θ_{mc} 之间没有滞后(对电磁铁采用深 度电流反馈的控制方法等),利用 Matlab 仿真可以得 到耐高压旋转电磁铁在两相相位差为 90°的正弦波电 流控制下的频率响应和阶跃响应等动态特性。

3 实验

3.1 矩角特性实验

对旋转电磁铁样机搭建如图 4 所示的矩角特性 测试系统。电磁铁通过联轴器连接扭矩传感器的输 入轴,扭矩传感器输出轴则通过联轴器与固定块相 连。控制器通过专用的控制算法控制 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 ;电磁铁转子实际角位移 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 $\theta - \theta_m$ 称 为失调角,也就是矩角特性曲线横坐标值。测试时 电磁铁的转子轴连接到固定块使得转子角位移 θ 恒 保持为零,控制器通过改变两相电流改变旋转磁场 角位移以得到失调角值,对应的输出力矩则由扭矩 传感器测出,两路数据送入记忆示波器后便可得到 矩角特性的实验结果。

图 5 所示为绕组电流分别为 0.5、1.5、2.5 和



图 4 矩角特性测试系统 Fig. 4 Experimental system for torque-angle characteristics 1. 计算机 2. 控制器 3. 角位移传感器 4. 电磁铁 5. 记忆示 波器 6. 扭矩传感器 7. 联轴器 8. 固定块

3.5 A 的情况下,实验得到的耐高压旋转电磁铁的 矩角特性,其对应的静力矩幅值分别达到 0.075、 0.1、0.12 和 0.19 N·m 左右,矩角特性的波形大体 上呈正弦波形,由于其本身轴向分相带来的磁路不 对称而导致自定位力矩的存在,使得矩角特性的波 形也呈现不对称的状态,这和前面解析分析的结果 一致。这也反映了传统的定子径向分相结构由于磁 路对称,其矩角特性也较为对称,其动态响应较 高^[11-12];而定子轴向分相结构虽然可以做成湿式耐 高压结构,但同时也会带来磁路不对称的问题,从而 影响电磁铁的各项静动态特性。



3.2 动态特性实验

耐高压旋转电磁铁的动态性能测试系统如图 6



Fig. 6 Experimental system for dynamic characteristics of rotary electromagnet

 1. 计算机 2. 控制器 3. 角位移传感器 4. 电磁铁 5. 信号发 生器 6. 记忆示波器

所示。信号发生器主要用来产生旋转电磁铁所需的 正弦波输入信号。控制器则主要根据来自信号发生 器的输入信号按照固化在 DSP 芯片中的连续跟踪 控制算法驱动电磁铁转动。电磁铁的转角输出信号 则由固定在电磁铁后端的角位移传感器通过 SPI 接 口送回电磁铁控制器。信号发生器所产生的输入信 号和电磁铁的转角输出信号分别送记忆示波器记录 输出。通过不同频率的正弦信号跟踪,可以绘制出 耐高压电磁铁的实验幅频特性和相频特性。图 7 和 图 8 所示为不同频率正弦信号下的仿真和实验得到 的频率响应曲线,可以看到旋转电磁铁在低频段时 输出信号能够良好的跟随输入信号的变化,在高频 段也具有较好的频率响应。图 9 和图 10 所示为仿 真和实验得到的幅频及相频特性曲线对比,可以看 到旋转电磁铁的仿真幅频宽和相频宽分别达到了约 115 Hz/-3 dB 和 80 Hz/-90°, 而其实验幅频宽和 相频宽分别达到 113 Hz/-3 dB 和 65 Hz/-90°左 右。图 11 所示则为其仿真和实验的阶跃响应曲线 对比,其仿真的阶跃响应上升时间约为15 ms,而实 验测得的上升时间约为18 ms 左右。可以看到,旋 转电磁铁动态特性的实验结果和仿真分析基本一 致,但相频特性滞后幅频特性较多,在控制方法上需 要考虑相位滞后的校正方法。



(a) 10 Hz (b) 60 Hz (c) 120 Hz





参考文献

- 1 雷天觉. 新编液压工程手册[M]. 北京:北京理工大学出版社,1998.
- 2 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 proportional solenoid for rotary servo valve [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2008,44(9):230~235. (in Chinese)
- 3 李其朋,丁凡,王传礼. 耐高压双向比例电磁铁的研究[J]. 浙江大学学报:工学版,2006,40(2):322 ~ 325. Li Qipeng, Ding Fan, Wang Chuanli. Research on the high-pressure bi-directional proportional solenoid [J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science, 2006,40(2):322 ~ 325. (in Chinese)
- 4 李勇,丁凡,李其朋,等.低功耗耐高压双向线性力马达静态力特性研究[J].浙江大学学报:工学版,2009,43(1):135~137. Li Yong, Ding Fan, Li Qipeng, et al. Static force characteristics of low-power-consumption bi-directional linear force motor used for high hydraulic pressure [J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science, 2009,43(1):135~137. (in Chinese)

17 ~ 33.

4 刘琳,谷寒雨,席裕庚.加工时间不确定的 Just-in-time 单机鲁棒调度[J]. 控制与决策,2007,22(10):1151~1154, 1159.

Liu Lin, Gu Hanyu, Xi Yugeng. Robust scheduling in a Just-in-time single machine system with processing time uncertainty [J]. Control and Decision, 2007, 22(10): 1151 ~ 1154, 1159. (in Chinese)

- 5 Yu G, Qi X T. Disruption management: framework, models and applications [M]. Singapore: World Scientific Publishing, 2004.
- 6 Qi X T, Bard J F, Yu G. Disruption management for machine scheduling: the case of SPT schedules [J]. International Journal of Production Economics, 2006, 103(1): 166~184.
- 7 Abumaizar R J, Svestka J A. Rescheduling job shops under random disruptions [J]. International Journal of Production Research, 1997, 35(7): 2065 ~ 2082.
- 8 Yang J, Qi X, Yu G. Disruption management in production planning [J]. Naval Research Logistics, 2005, 52(5): 420 ~ 442.
- 9 严培胜,邓薇,高成修. 单机排序中带可分配工期的总误工问题的应急管理[J]. 高校应用数学学报 A 辑,2004,19(增刊1):543~549.

Yan Peisheng, Deng Wei, Gao Chengxiu. Disruption management for single machine scheduling with assignable due dates to total tardiness [J]. Applied Mathematics A Journal of Chinese Universities, 2004, 19(Supp.1): 543 ~ 549. (in Chinese)

- 10 曹晓刚,闻卉,黄崇超. 单机排序中关于完工前总损失的应急管理[J]. 数学物理学报,2009,29A(4):940~948.
 Cao Xiaogang, Wen Hui, Huang Chongchao. Disruption management for single machine scheduling on total loss before completion [J]. Acta Mathematica Scientia, 2009, 29A(4): 940~948. (in Chinese)
- 11 Wang J, Liu F, He P. Rescheduling under predictive disruption of WSPT schedule for single machine scheduling [J]. ICIC Express Letter, 2010, 4(2): 467 ~ 472.
- 12 Zimmermann H J. Fuzzy set theory and its application [M]. London: Kluwer Academic Publishers, 2001.
- 13 Stützle T, Hoos H. Improvements on theant system: introducing MAX-MIN ant system [M] // Smith G D, Steele N C, Albrecht R F. Proceedings of ICANNGA'97, Int. Conf. on Artificial Neural Net and Genetic Algorithms: Springer Verlag, 1997.
- 14 王颖,谢剑英. 一种自适应蚁群算法及其仿真研究[J]. 系统仿真研究,2002,14(1):31~33.
 Wang Ying, Xie Jianying. An adaptive ant colony optimization algorithm and simulation [J]. Acta Simulata Systematica Sinica, 2002, 14(1): 31~33. (in Chinese)

(上接第 245 页)

- 5 孟彬,阮健,邢彤,等. 耐高压低惯量直动式电-机械转换器,中国:200910097093.3[P].2010-12-08.
- 6 阮健, 孟彬. 耐高压低惯量旋转电磁铁, 中国: 200910095983.0 [P]. 2011-02-09.
- 7 阮健,裴翔,李胜. 2D 数字换向阀[J]. 机械工程学报,2000,36(3):86~89. Ruan Jian, Pei Xiang, Li Sheng. 2D digital directional control valve[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2000, 36(3):86~89. (in Chinese)
- 8 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)
- 9 李胜, 阮健. 步进电机电-机械转换器的闭环连续跟踪控制方法, 中国: 200910097093.3 [P]. 2010-12-08.
- 10 Takashi K, Akira S. Stepping motors and their microprocessor controls [M]. USA: Oxford University Press, 1994.
- 11 孟彬, 阮健, 李胜. 2-D 数字阀用低惯量旋转电磁铁及其矩角特性研究[J]. 农业机械学报, 2011, 42(12): 220~224, 230.

Meng Bin, Ruan Jian, Li Sheng. Low inertia rotary electromagnet of 2-D digital valve and research on its torque-angle characteristic. [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011,42(12): 220 ~ 224,230. (in Chinese)

12 孟彬,阮健,李胜. 低惯量旋转电磁铁的动态特性研究 [J]. 中国机械工程,2011,22 (20):2407~2410,2459. Meng Bin, Ruan Jian, Li Sheng. Research on dynamic characteristics of rotary electromagnet with low inertia [J]. China Mechanical Engineering, 2011, 22(20): 2407~2410, 2459. (in Chinese)