

基于遗传算法的电涡流测功机预测控制^{*}

程广伟 周志立 邓楚南 徐立友

【摘要】 利用电涡流测功机加载转矩对外控输入电压的响应特性,建立了电涡流测功机预测控制的动态矩阵,采用遗传算法对动态矩阵控制(DMC)的参数进行了整定,在对电涡流测功机的机械特性进行研究的基础上,对动态矩阵预测控制方法在电涡流测功机控制中的应用进行了研究。仿真试验表明,采用基于遗传算法整定 DMC 参数设计的 DMC 控制器进行 DMC 控制,转矩从零上升到 320 N·m 用时约 800 ms,比不采用 DMC 控制时提高了 60%,控制稳定时转矩误差为 10 N·m。

关键词: 电涡流测功机 动态矩阵控制 遗传算法 动态特性

中图分类号: TP273 **文献标识码:** A

Predictive Control of the Eddy Current Dynamometer Based on Genetic Algorithm

Cheng Guangwei¹ Zhou Zhili² Deng Chu'nan³ Xu Liyou²

(1. Luoyang Institute of Science and Technology, Luoyang 471073, China

2. He'nan University of Science and Technology, Luoyang 471003, China

3. Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

Abstract

According to the response characteristics of the load torque to the external input voltage by the eddy current dynamometer, the dynamic matrix for predictive control of the eddy current dynamometer was established. The parameters of the dynamic matrix control (DMC) were tuned by adopting genetic algorithm. Based on the research of the mechanical characteristics of the eddy current dynamometer, the application of the dynamic matrix predictive control method on the eddy current dynamometer was studied subsequently. The simulation results show that the time-consuming of raising the turning torque from zero to 320 N·m is about 800 ms by using the DMC controller based on the genetic algorithm. The efficiency is improved by 60% and the torque error is 10 N·m under stability control.

Key words Eddy current dynamometer, Dynamic matrix control, Genetic algorithm, Dynamic characteristics

引言

液压机械无级变速器(HMCVT)是一种适用于履带拖拉机的新型动力传动装置^[1~2],在进行 HMCVT 性能台架试验过程中常采用电涡流测功机作为车辆行驶载荷模拟设备。

为提高电涡流测功机的控制性能与动态响应速度,前人对电涡流测功机的控制方法进行了研究^[3~4],其中以预测控制与自适应控制较为先进。但由于缺乏设计参数和控制性能之间的解析关系,为确定设计参数,一般根据设计参数对控制系统的定性影响趋势,通过仿真或试验对参数进行整定,以

收稿日期: 2007-07-11

^{*} 河南省高校杰出科研人才创新工程项目(项目编号:2002KYCX010)和河南科技大学重点学科建设项目(项目编号:20030110)

程广伟 洛阳理工学院机械系 副教授 博士, 471073 河南省洛阳市

周志立 河南科技大学车辆与动力工程学院 教授 博士生导师, 471003 洛阳市

邓楚南 武汉理工大学汽车工程学院 教授 博士生导师, 430070 武汉市

徐立友 河南科技大学车辆与动力工程学院 副教授 博士

整定结果作为固定不变的参数进行动态矩阵控制(dynamic matrix control,简称DMC),所以难以保证控制质量。本文在研究电涡流测功机加载特性的基础上,对基于动态矩阵预测加载方法进行改进,采用遗传算法对动态矩阵的参数进行优化。

1 电涡流测功机的加载特性

电涡流测功机产生的制动转矩 M_D 是由励磁电流 I 和转速 n 决定的,即 $M_D = f(I, n)$ 。通常称电涡流测功机励磁电流不变时的转矩-转速曲线为电涡流测功机的机械特性,又称定电流控制特性,如图1所示。

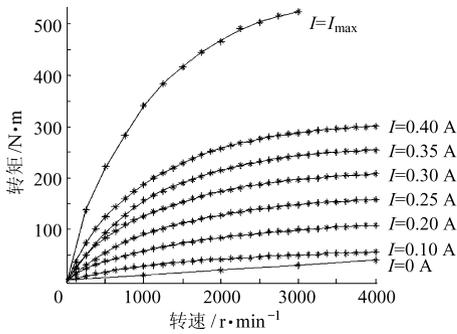


图1 电涡流测功机机械特性曲线

Fig.1 Mechanical characteristics curves of the eddy current dynamometer

通过改变外控输入电压 U 可改变励磁电流 I , 所以电涡流测功机制动转矩可由外控输入电压加以控制。电涡流测功机的稳态加载过程中, $I = U/R$, 其中 R 为励磁电阻,此时

$$M_D = f(I, n) = f(U/R, n) = g(U, n) \quad (1)$$

电涡流测功机在动态加载过程中,其励磁电流对外加电压的单位阶跃响应为^[4]

$$i(k) = (1 - e^{-\frac{kT}{\tau}})/R \quad (2)$$

式中 T ——采样周期 k ——时间因子

τ ——励磁电路的时间常数

当外控输入电压为 U 时,励磁电流的响应为

$$I(k) = U(1 - e^{-\frac{kT}{\tau}})/R \quad (3)$$

设 k 时刻电涡流测功机的转速为 $n(k)$, k 时刻电涡流测功机动态加载电压为

$$U(k) = I(k)R = U(1 - e^{-\frac{kT}{\tau}}) \quad (4)$$

电涡流测功机施加的制动转矩为

$$M_D(k) = f(n(k), I(k)) = f(n(k), U(k)/R) = g(n(k), U(1 - e^{-\frac{kT}{\tau}})) \quad (5)$$

由式(5)可以看出,电涡流测功机加载转矩对外控输入电压的响应时间主要取决于励磁电流对外控电压的响应时间。

2 电涡流测功机的 DMC 预测控制模型

电涡流测功机的响应时间相对较长,施加的制动转矩受转速的影响大,传统的 PID 控制难以满足测试无级变速器的需要。采用预测控制模拟测功机的加载,具有较好的瞬态特性和对模型不匹配的鲁棒性^[5-6]。

DMC 控制具有预测控制的 3 个基本特征^[7-8], 即预测模型、滚动优化、反馈校正。根据电涡流测功机的吸收转矩模型式(5),设预测时域长度为 N_1 ,控制时域长度为 N_2 ,建模时域长度为 N ;在每一采样时刻 k ,对电涡流测功机未来 N_1 个时刻的输出进行预测,确定未来的 N_2 个控制增量: $\Delta u(k)$, $\Delta u(k+1), \dots, \Delta u(k+N_2-1)$ ($k+N_2-1$ 时刻后的 Δu 取为零),使得输出预测值 $M_{N_2}(k+j|k)$ ($j=1, 2, \dots, N_2$) 尽可能接近期望值,即满足

$$\min J(k) = \sum_{j=1}^{N_1} q_j [M_D(k+1) - M_{N_2}(k+j|k)]^2 + \sum_{s=1}^{N_2} r_s \Delta u^2(k+s-1) \quad (6)$$

式中 q_j, r_s ——误差权和控制权系数

$k+j|k$ ——在 k 时刻对 $k+j$ 时刻的预测值
由预测控制理论可得控制增量向量

$$\Delta U(k) = (\mathbf{A}^T \mathbf{Q} \mathbf{A} + \mathbf{R})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{Q} [\mathbf{M}_r(k+1) - \mathbf{A}_0 \Delta U_0(k+1) - \mathbf{H} \mathbf{E}(k)] \quad (7)$$

其中

$$\Delta U(k) = [\Delta u(k) \quad \Delta u(k+1) \quad \dots \quad \Delta u(k+N_2-1)]^T$$

$$\mathbf{Q} = \text{diag}(q_1, q_2, \dots, q_{N_1})$$

$$\mathbf{R} = \text{diag}(r_1, r_2, \dots, r_{N_2})$$

$$\mathbf{M}_r(k) = [M_r(k+1) \quad M_r(k+2) \quad \dots \quad M_r(k+N_1)]^T$$

$$\Delta U_0 = [\Delta u(k-N) \quad \Delta u(k-N+1) \quad \dots \quad \Delta u(k-1)]^T$$

$$\mathbf{H} = [h_1 \quad h_2 \quad \dots \quad h_{N_1}]^T$$

$$\mathbf{E}(k) = [e_r(k+1) \quad e_r(k+2) \quad \dots \quad e_r(k+N_1)]^T$$

$$e_r(k+1) = M(k+1) - M_1(k+1|k)$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} a_1 & & & & 0 \\ a_2 & a_1 & & & \\ \vdots & \vdots & & & \\ a_{N_2} & & & a_1 & \\ \vdots & & & \vdots & \\ a_{N_1} & \vdots & & a_{N_2-N_1+1} & \end{bmatrix}_{N_1 \times N_2}$$

$$\mathbf{A}_0 = \begin{bmatrix} a_N & a_N & a_{N-1} & a_{N-2} & \dots & a_3 & a_2 \\ a_N & a_N & a_N & a_{N-1} & \dots & a_4 & a_3 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a_N & a_N & a_N & a_N & \dots & a_{N_1} & a_{N_1+1} \end{bmatrix}_{N_1 \times N}$$

$$a_j = 1 - e^{-\frac{jT}{\tau}}$$

式中 $\Delta U(k)$ ——待求控制增量向量

Q ——预测误差加权矩阵

R ——控制量加权矩阵

$M_r(k)$ ——参考输出向量

ΔU_0 ——已知控制增量向量

H ——修正系数矩阵 A, A_0 ——动态矩阵

$E(k)$ ——预测模型输出误差

$M(k+1)$ ——实测转矩值

从而可以建立 DMC 预测控制模型

$$M_D(k+1) = M_0(k+1) + A\Delta U(k) \quad (8)$$

其中 $M_0(k+1) = [M_0(k+1|k) \cdots M_0(k+N|k)]^T$ 为在 k 时刻预测无 $\Delta U(k)$ 作用时未来 N_x 个时刻的预测模型输出向量。

3 基于遗传算法参数优化的 DMC

DMC 预测控制采用多步预测、滚动优化、反馈校正的控制策略,扩大了反映系统动态特性的有用信息,提高了系统运行的稳定性和鲁棒性。但采用多步预测方式与滚动优化策略时,为系统引入了与 DMC 控制效果有关的设计参数 N_1, N_2, Q, R 。由于缺乏设计参数和控制性能之间的解析关系,为确定设计参数,一般根据设计参数对控制系统的定性影响趋势,通过仿真或试验对参数进行整定,以整定结果作为固定不变的参数进行 DMC 控制,所以难以保证控制质量。本文提出采用遗传算法(genetic algorithm,简称 GA)对 DMC 设计参数 N_1, N_2, Q, R 进行优化整定。

取 $q_i = q, r_s = r$, DMC 算法优化参数为 $\{N_1, N_2, q, r\}$, 参数优化的目标为在动态矩阵参数已知的条件下,选取合适的 $\{N_1, N_2, q, r\}$ 值,使得在由式(7)确定的控制量作用下,获得满意的系统控制效果。

3.1 目标函数的确定

对于 DMC 控制的电涡流测功机电加载系统控制性能的评价,既有动态指标,又有静态指标,属多参量、多目标优化问题^[9~10],此处引入满意度的概念,将多参数多目标优化问题转化为标量满意度的优化问题。文献[11]的试验研究表明,电涡流测功机预测控制的单位阶跃响应近似如图 2 所示,带有一定的振荡。根据图 2 的特征,定义电涡流测功机控制性能的满意度函数如图 3 所示。以对各满意度求和作为系统综合控制性能的评价,即

$$S = S_r + S_s + S_K + S_\sigma \quad (9)$$

故可建立优化目标函数

$$\begin{cases} \max S = S_r + S_s + S_K + S_\sigma \\ S_r = f(t_r) \\ S_s = f(t_s) \\ S_K = f(K_p) \\ S_\sigma = f(\sigma) \end{cases} \quad (10)$$

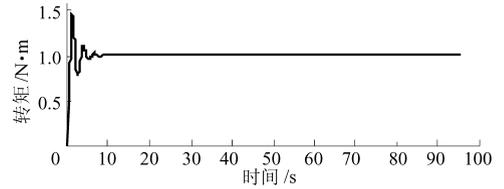


图 2 单位阶跃响应曲线

Fig. 2 Unit-step response curve

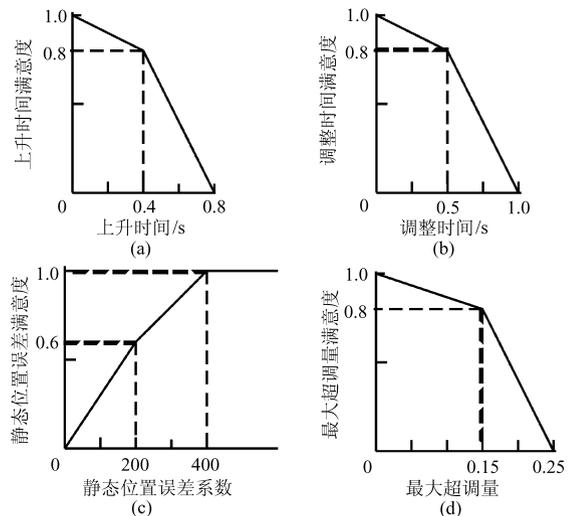


图 3 控制性能指标的满意度函数

Fig. 3 Satisfactory optimization function of the control performance

- (a) 上升时间满意度 S_r 随上升时间 t_r 的变化函数
- (b) 调整时间满意度 S_s 随调整时间 t_s 的变化函数
- (c) 静态位置误差满意度 S_K 随静态位置误差系数 K_p 的变化函数
- (d) 最大超调量满意度 S_σ 随最大超调量 σ 的变化函数

3.2 GA 的实现

为利用遗传算法对 DMC 设计参数 N_1, N_2, Q, R 进行优化,对 $\{N_1, N_2, q, r\}$ 采用实数编码方法,参数选择范围为 $\{[20, 160], [1, 80], [0, 1], [0, 1]\}$;在优化参数的选取范围内完全随机地产生初始种群,种群规模为 10,进化代数 100 代,代沟为 0.9;个体适应度函数取 $f_a = S$;遗传操作中的选择运算使用比例选择算子,个体被选择的概率由其适应度在群体中所占的比例决定,即 $f_a(X_i) / \sum_{i=1}^{n_p} f_a(X_i)$,其中 n_p 为群体的大小, $f_a(X_i)$ 为个体 i 的适应度;交叉运算随机选择 2 个个体作为母体,再随机在这 2 个个体的某一对应位置,将其后的子串进行交换,而形成 2 个新的个体;对个体不同基因段分别执行

变异操作的方法来实现个体变异,变异概率取为 0.000 1。

3.3 基于 GA 的 DMC 实现步骤

由前述分析可知,基于 GA 的电涡流测功机的 DMC 预测控制步骤为:

(1) 根据电涡流测功机电加载阶跃模型,建立预测控制模型。

(2) 基于 GA 对电涡流测功机进行仿真控制,优化预测控制器参数,运用该模型优化预测控制模型。

(3) 根据输入规范与车辆传动系阻力载荷模型预测出电涡流测功机的加载转矩 $M_{Dr}(k+1)$ 和电涡流测功机的转速 $N_{Dr}(k+1)$,其中

$$\begin{aligned} M_{Dr}(k+1) = & \\ [M_{Dr}(k+1) \ M_{Dr}(k+2) \ \cdots \ M_{Dr}(k+N_1)]^T & \\ N_{Dr}(k+1) = & \\ [n_{Dr}(k+1) \ n_{Dr}(k+2) \ \cdots \ n_{Dr}(k+N_1)]^T & \end{aligned}$$

根据 $M_{Dr}(k+i)$ 和 $N_{Dr}(k+i)$ 由电涡流测功机的加载模型式(5)可求出 $U(k+i)$ 。

(4) 依据每步的参考输出 $M_r(k)$ 、预测模型输出误差 $E(k)$ 、动态矩阵 A 、预测误差加权矩阵 Q 、控制量加权矩阵 R 、动态矩阵 A_0 、已知控制增量向量 ΔU_0 、修正系数矩阵 H ,确定该步的控制增量向量 $\Delta U(k)$,并进行加载。

3.4 电涡流测功机的预测控制

根据所建立的履带拖拉机行驶载荷模型及其在电涡流测功机上的加载模型,具有预测加载功能的控制原理如图 4 所示。

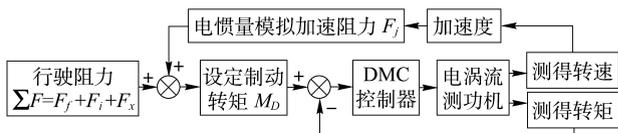


图 4 电涡流测功机 DMC 控制原理框图
Fig. 4 Control principle of the eddy current dynamometer based on DMC technology

根据试验人员输入的拖拉机基本参数与设定工况,计算机自动设定加载转矩值,通过预测控制器为电涡流测功机提供合适的电压输入,电涡流测功机产生制动转矩。转速反馈用于电惯量模拟拖拉机加速阻力的计算,调节设定载荷;电惯量取代机械惯量,既减小了测试系统机械机构的复杂性,又增加了机械惯量模拟的灵活性。

3.5 仿真模拟与试验

为了实现参数优化的 DMC 预测控制算法对电涡流测功机的控制,首先以南峰机电设备有限公司生产的 CW150 型电涡流测功机为研究对象,建立

DMC 预测控制器,基于 GA 进行了 DMC 参数优化,在采样周期为 0.01 s 的条件下,经过 100 代遗传优化后的参数为 $N_1=40, N_2=2, q=1, r=0.568$ 。

运用仿真得到的 DMC 优化参数编制应用程序对电涡流测功机进行 0~320 N·m 下的仿真与加载试验,结果如图 5 所示。由图可知,电涡流测功机转矩从零上升到 320 N·m 用时约 800 ms(而不采用 DMC 控制时系统响应时间约为 2 s),仿真与试验曲线均表明,DMC 预测控制显著提高了电涡流测功机的响应速度。

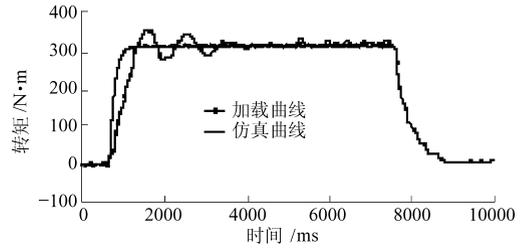


图 5 DMC 预测控制下的电涡流测功机阶跃响应
Fig. 5 Step response curves of the eddy current dynamometer based on DMC technology

在控制达到稳态时,转矩的最大变化量约为 10 N·m,符合传动系试验对转矩不超过全负荷的 ±0.5% 控制精度的要求。即采用基于遗传算法整定 DMC 参数设计的 DMC 控制器,可以大大提高电涡流测功机系统控制的动态特性与响应速度,具有良好的稳定性与鲁棒性。

图 6 为东方红 1302R 型履带拖拉机随转速、加速度加载的实际历程曲线。由图 6 可知,测功机加载的实时性好,载荷模拟精度高,所研究的 DMC 预测控制方法是有效的。

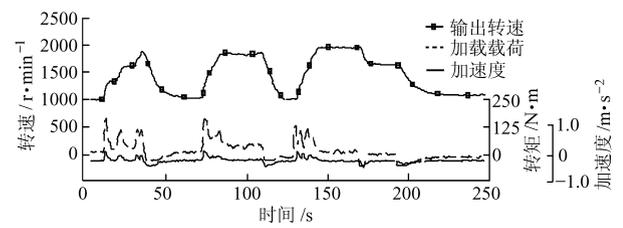


图 6 阻力载荷加载试验曲线
Fig. 6 Test curves of the resistance loading

4 结束语

在电涡流测功机机械特性研究的基础上,对动态矩阵预测控制方法在电涡流测功机控制中的应用进行了研究。仿真试验表明,采用基于遗传算法整定 DMC 参数设计的 DMC 控制器,可以大大提高电涡流测功机系统控制的动态特性与响应速度,具有良好的鲁棒性,能够用于履带拖拉机 HMCVT 的动态特性试验的电涡流测功机控制。

参 考 文 献

- 1 徐立友,周志立,张明柱,等. 拖拉机液压机械无级变速器设计[J]. 农业机械学报, 2006, 37(7): 5~8.
Xu Liyou, Zhou Zhili, Zhang Mingzhu, et al. Design of hydro-mechanical continuously variable transmission of tractor[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2006, 37(7): 5~8. (in Chinese)
- 2 曹付义,周志立,贾鸿社. 履带车辆转向性能计算机仿真研究概况[J]. 农业机械学报, 2007, 38(1): 184~188.
Cao Fuyi, Zhou Zhili, Jia Hongshe. Research summarization on simulation of turning performance of tracked vehicle[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007, 38(1): 184~188. (in Chinese)
- 3 葛安林,李永军,牛铭奎,等. 电涡流测功器自适应控制研究[J]. 汽车工程, 2000, 22(3): 210~213.
Ge Anlin, Li Yongjun, Niu Mingkui, et al. A study on adaptive control for eddy current dynamometer[J]. Automotive Engineering, 2000, 22(3): 210~213. (in Chinese)
- 4 张俊智,卢青春. 发动机动态试验台混合模拟方法的仿真研制[J]. 内燃机学报, 2000, 18(1): 1~5.
Zhang Junzhi, Lu Qingchun. Study on the hybrid simulation method of engine dynamic test-bed by simulation[J]. Transactions of CSICE, 2000, 18(1): 1~5. (in Chinese)
- 5 李永军,牛铭奎,葛安林. 基于CAN总线的机械式自动变速器综合控制研究[J]. 农业机械学报, 2000, 31(2): 12~15.
Li Yongjun, Niu Mingkui, Ge Anlin. Synthetic control of automated mechanical transmission based on controller area network [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2000, 31(2): 12~15. (in Chinese)
- 6 罗刚,金炜东,李治. 动态矩阵控制参数的满意优化[J]. 信息与控制, 1999, 28(1): 75~79.
Luo Gang, Jin Weidong, Li Zhi. Satisfactory optimization of parameters in dynamic matrix control[J]. Information and Control, 1999, 28(1): 75~79. (in Chinese)
- 7 席裕庚. 预测控制[M]. 北京:国防工业出版社, 1993.
- 8 诸静. 智能预测控制及其应用[M]. 杭州:浙江大学出版社, 2002.
- 9 金炜东,陈立,李岗. 遗传算法用于控制器参数的满意优化[J]. 西南交通大学学报, 1998, 33(6): 609~703.
Jin Weidong, Chen Li, Li Gang. Satisfactory optimization of controller parameters using genetic algorithm[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 1998, 33(6): 609~703. (in Chinese)
- 10 Rani K Y, Unbehauen H. Study of predictive controller tuning methods[J]. Automatica, 1997, 33(12): 2 243~2 248.
- 11 曹毅. 355 kW 传动试验台测试及控制系统研究[D]. 北京:北京理工大学, 2003.
Cao Yi. Reserch on test and control system of the 355 kW transmission test bed [D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2003. (in Chinese)