交流伺服电动机数值分析

张建华，杨鹏
（扬州大学信息工程学院，江苏 扬州 225009）

摘 要：根据交流电机不对称运行的分析方法——对称分量法，对交流伺服电动机的运行进行分析。在交流伺服电动机等效电路的基础上，建立了分析交流伺服电动机的基本方程。利用MATLAB语言编程对交流伺服电动机的机械特性、调节特性及转速特性进行数值分析并绘制出相应的特性曲线。该方法与解析方法相比较，具有简单、精确、灵活等独特优点。

关键词：交流伺服电动机；数值分析；运行特性
文献标识码：A　　文章编号：1005-6254(2003)03-0035-04

0 引言

交流伺服电动机是一种受输入信号控制并作快速响应的电动机，在自动控制系统中作为执行元件。自动控制系统要求交流伺服电动机应具有：宽广的调速范围；机械特性和调节特性均为线性；电动机的转速能随着控制电压的改变而迅速变化，即具有快速响应能力。交流伺服电动机实质上是不对称的两相异步电动机，通常对交流伺服电动机的分析是采用对称分量法，将两相绕组的不对称磁势分解成两组两相对称的分量来研究。由于其解析法过于复杂，对交流伺服电动机运行特性一般只在特定条件下进行定性分析。对动态性能的分析采用近似计算。本文利用数值分析的方法对交流伺服电动机进行分析，该方法具有简单、精确、灵活等独特优点。尤其是在只要求获得精确数值计算结果的场合，它的优越性更加明显。

1 交流伺服电动机的理论分析

1.1 交流伺服电动机的等效电路

根据对称分量法，将交流伺服电动机的控制绕组和励磁绕组经过归算后分别构成正序等效电路和负序等效电路如图1所示[1]。

图1a、1b分别为控制绕组的正序等效电路和负序等效电路；1c、1d分别为励磁绕组的正序等效电路和负序等效电路。其中，R_{sc}、$X_{\sigma c}$为控制

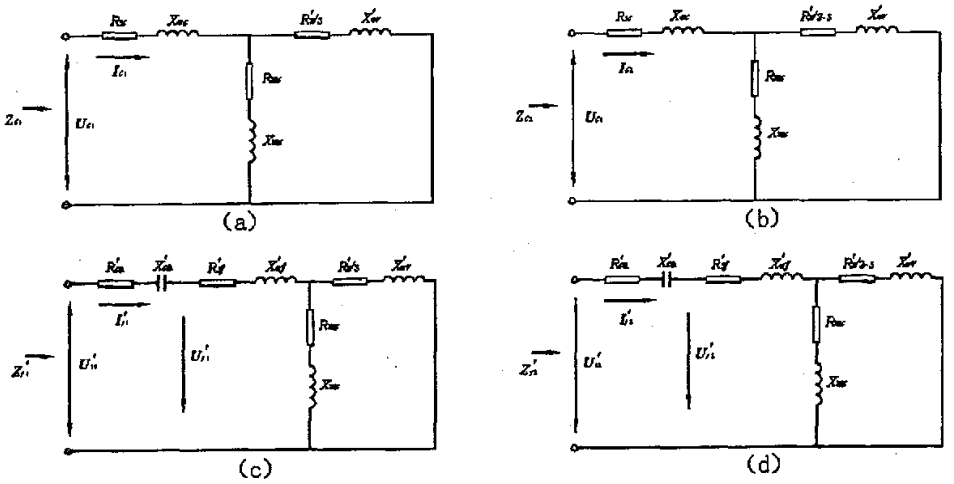

图1 交流伺服电动机的等效电路

作者简介：张建华(1960-)，男，江苏南通人，讲师，主要从事电机及拖动方面的研究工作。

万方数据

绕组电阻及漏电抗；R_{mc}、X_{mc}为电机铁芯损耗等效电阻及励磁电抗；R'_r、$X'_{\sigma r}$为转子绕组电阻及漏电抗；R'_{ca}、X'_{ca}为电容器电阻及电抗；R'_{sf}、$X'_{\sigma f}$为励磁绕组电阻及漏电抗；s为转差率。

1.2 交流伺服电动机的基本方程

根据电压平衡关系，在控制绕组回路中有：

$$\boldsymbol{U}_c = \boldsymbol{U}_{c1} + \boldsymbol{U}_{c2} = \boldsymbol{I}_{c1} Z_{c1} + \boldsymbol{I}_{c2} Z_{c2} \tag{1}$$

同理，在励磁绕组回路中有：

$$\boldsymbol{U}'_1 = \boldsymbol{U}'_{11} + \boldsymbol{U}'_{12} = \boldsymbol{I}'_{f1} Z'_{f1} + \boldsymbol{I}'_{f2} Z'_{f2} \tag{2}$$

式中，$\boldsymbol{U}'_1 = n_{cf}\boldsymbol{U}_1$，$n_{cf}$为控制绕组和励磁绕组的有效匝数比。

通常，电动机的励磁绕组和控制绕组的型式完全相同，所以经归算后则有：

$$R'_{sf} = R_{sc}\ ;\ X'_{\sigma f} = X_{\sigma c}\ ;\ Z'_{\sigma f} = Z_{\sigma c}$$

由（1）、（2）式知，如果已知伺服电动机的控制和励磁绕组的正序与负序阻抗Z_{c1}、Z_{c2}；Z'_{f1}、Z'_{f2}以及它们的电压U_C和U'_1，便可得出电流的各对称分量。根据感应电动机的原理可知，电动机的电磁转矩可由电磁功率和同步角速度求得。由于交流伺服电动机经常工作在不对称状态，电机中既有正序电磁功率P_{em1}，又有负序电磁功率P_{em2}。由等效电路可知，正、负序电磁功率的表达式很复杂。为简化起见，略去电机的励磁电流，则有：

$$P_{em1} = I^2_{c1} R'_r / s + I'^2_{f1} R'_r / s$$

$$P_{em2} = I^2_{c2} R'_r / (2-s) + I'^2_{f2} R'_r / (2-s)$$

交流伺服电动机正序电磁转矩数值方程为：

$$T_{em1} = \frac{P_{em1}}{\Omega_s} = \frac{60}{2\pi}\frac{P_{em1}}{n_s} = 9.55\frac{P_{em1}}{n_s}$$

交流伺服电动机负序电磁转矩数值方程为：

$$T_{em2} = \frac{P_{em2}}{\Omega_s} = \frac{60}{2\pi}\frac{P_{em2}}{n_s} = 9.55\frac{P_{em2}}{n_s}$$

式中，T_{em1}、T_{em2}为正、负序电磁转矩（N·m）；Ω_s为电机的同步角速度（rad/s）；n_s为电机的同步转速（r/min）。

在交流伺服电动机中的电磁转矩是正序电磁转矩与负序电磁转矩之差。所以交流伺服电动机的电磁转矩数值方程为：

$$T_{em} = 9.55\frac{(P_{em1} - P_{em2})}{n_s} \tag{3}$$

由于交流伺服电动机的机械特性非线性，要得到转速特性的解析表达式将十分困难，在交流电机理论分析中对此都不进行分析。利用计算机采用数值积分法，可较为方便的得出转速特性的数值解，并绘制出转速特性曲线。

由电力拖动系统的运动方程[2]：

$$Tem - Tz = \frac{GD^2}{375}\frac{dn}{dt}$$

可得：

$$n = \int (375/GD^2)(Tem - Tz)dt \tag{4}$$

式中，GD^2为飞轮矩（N·m²）。且$GD^2 = 4gJ$，J为转动惯量（kg·m²）。

方程（1）、（2）、（3）、（4）是对交流伺服电动机运行特性进行数值分析的理论基础。

2 交流伺服电动机运行特性的数值分析

由于在交流伺服电动机数值分析中，涉及到大量的复数运算、积分计算及数据处理和图形处理，因此选用MATLAB语言进行编程。与C、C++、FORTRAN等语言相比，MATLAB语言不但在数学语言的表达上与解释方面表现出人机交互的高度一致，而且具有高质量、高可靠的数值计算能力，特别是复数运算、基于向量、矩阵和数组的处理能力及高级图形和可视化数据处理能力[3]。

交流伺服电动机的控制方式有幅值控制、相位控制、幅值——相位控制三种。交流伺服电动机的运行特性包括机械特性、调节特性、动态性能三个方面。本文以一台交流伺服电动机为例，对其在幅值控制时的运行特性进行数值分析。

交流伺服电动机参数为：n_{cf}=0.5，R_{sc}=75Ω，$X_{\sigma c}$=75Ω，X_{mc}=150Ω，R'_r=300Ω，$X'_{\sigma r}$=4.5Ω，p=1，f=50Hz，U=115V，J=0.245×10⁻⁵ kg·m²。

交流伺服电动机在幅值控制时有：

$$\boldsymbol{U}_c = -j\alpha'\boldsymbol{U}'_1$$

式中，α'为有效信号系数。

2.1 机械特性分析

交流伺服电动机的机械特性是指在有效信号系数一定的条件下，电磁转矩与转速的关系。本文对有效信号系数分别为0.25、0.5、0.75、1时的机械特性进行数值计算，绘制出相应的机械特性曲线如图2所示。

万方数据

由图中可以看出，交流伺服电动机的机械特性曲线是非线性的，且随着有效信号系数的增大线性度越差；交流伺服电动机的理想空载转速与有效信号系数的值有关，且随有效信号系数的值增加而增加。只有在有效信号系数为1时，理想空载转速才与同步转速相等。因为在理想空载时，电机中的磁场是圆形旋转磁场，根据感应电动机的运行原理可知理想空载转速等于同步转速；交流伺服电动机的堵转矩(转速为零时的电磁转矩)与有效信号系数成正比关系。

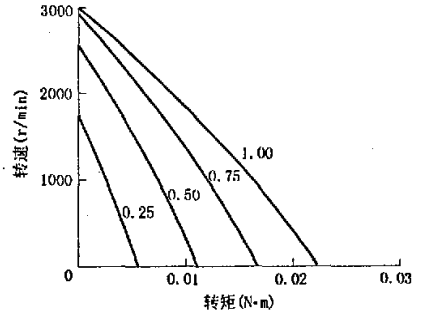

图2 机械特性

2.2 调节特性分析

交流伺服电动机在幅值控制时的调节特性是指在电磁转矩不变的条件下，转速与有效信号系数的关系。本文对电磁转矩分别为0.001、0.005、0.01、0.015牛顿时的调节特性进行数值分析，并得到相应的调节特性曲线如图3所示。

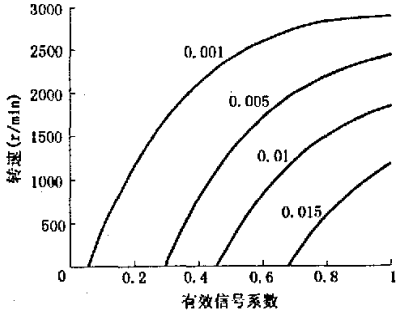

图3 调节特性

由图中可以看出，交流伺服电动机在幅值控制时的调节特性的线性度较差。其特点是：在电磁转矩较小时转速调节范围较大，但线性度很差；在电磁转矩较大时转速调节范围较小，但调节特性接近于线性关系。在电磁转矩一定时有效信号系数小时线性度好，效信号系数大时线性度差。

2.3 转速特性分析

对交流伺服电动机的动态性能进行理论分析时，一般都是先假设在有效信号系数为1，且认为电机的机械特性具有线性的条件下进行分析。在此基础上对有效信号系数不为1的情况及机械特性非线性对转速特性影响采用近似修正[1]。利用数值分析方法可以对交流伺服电动机动态性能进行精确的定量分析。

图4是对该电机在有效信号系数为1、0.5时进行数值分析所得到的理想空载起动转速特性曲线。有效信号系数为1时，空载起动时间为0.2745s；系数为0.5时，空载起动时间为0.4198s。由此可见，有效信号系数的改变对交流伺服电动机的动态特性有很大的影响。此外，交流伺服电动机所带的负载对动态性能也有很大的影响，利用数值分析方法同样可以进行精确分析。

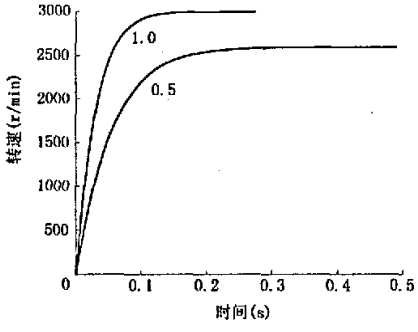

图4 空载起动转速特性

3 小结

本文只对交流伺服电动机在幅值控制时的运行特性进行数值分析。但由于是依据交流伺服电动机的基本方程，所以分析方法具有普遍性，即对相位控制、幅值——相位控制以及伺服电动机参数的改变对运行特性的影响也同样成立。利用数值分析方法不仅具有简单、精确、灵活等独特优点，同时对提高控制系统的稳定性及校正带来方便。

参考文献：

[1] 杨渝钦. 控制电机[M]. 北京：机械工业出版社，1999：22～46.

[2] 顾绳谷. 电机及拖动基础[M]. 北京：机械工业出版社，1998：94～99.

[3] 范影乐. MATLAB仿真应用详解[M]. 北京：人民邮电出版社，2001：19～67.

万方数据

Numerical Analysis of A.C. Servo-Motor

ZHANG Jian-hua, YANG Peng
(College of Information Engineering, Yangzhou Univ., Yangzhou 225009, China)

Abstract: According to symmetry factoring, the run characteristics are analyzed by means of numerical analysis in A.C. servo-motor. On the bases of equivalent circuit, establishes the basic equations of the servo-motor. Characteristic curves are protracted by MATLAB. Numerical analysis has the characteristics of briefness, visualization and higher precision as compared with analytics.

Key words: A.C. servo-motor; Numerical analysis; Run characteristics

(上接第 28 页)

Discuss the Design of the City Roadway Greenbelt Sprinkling System

DING Yuan-jian[1], *WANG Zi-yun*[2]
(1. Survey & Design Institute of Railway & Tunnel, Luoyang 471009, China; 2. Henan University of Science and Technology, Luoyang 471009, China)

Abstract: With the development of the city economic, the increase of the people's life standard and the tension of water resource, city roadway greenbelt auto sprinkling system become increasingly important. According to the city roadway construction's characteristics and the demand of water sprinkling system, the composes of city roadway greenbelt sprinkling system are introduced. The design method and steps are illustrated as bellow: material collecting, system sculpting, equipment choosing, sprinkling region plotting, tube net designing, and some correlation suggestion are brought out.

Key words: City roadway greenbelt; Sprinkling system; Design

泵与电机省级科技创新服务中心
浙江温岭市先导电机技术研究所
本所是专门从事电机、水泵产品开发与测试技术研究的高新技术企业，主要产品有：
一、水泵 CAD、电机 CAD、水泵标准汇编
二、水泵综合性能测试系统（水泵生产许可证必需检测设备）
检测流量、转速、压力、吸力；电压、电流、功率因数、频率、效率、温升
三、水泵出厂试验系统
检测耐压、绝缘电阻、低压起动、空载电流、空载功率
四、测功机、定子测试台、可靠性测试系统
五、水泵生产许可证取证服务：3C 认证服务
地址：浙江温岭大厦 13 层 8 号 邮编：317500 电话：0576-6144122 6144065
E-mail:jslz@mail.tzptt.zj.cn Http://www.zjxiandao.com

万方数据