

联合控制策略与多物理域有限元仿真的 异步电机软启动瞬态振动分析

赵津¹, 张庆^{1,2}, 魏晓晗¹, 马程鹏¹

(1. 西安交通大学机械工程学院, 710049, 西安;

2. 西安交通大学现代设计及转子轴承系统教育部重点实验室, 710049, 西安)

摘要: 为抑制异步电机软启动过程因电磁力所致的瞬态振动,提出了一种联合控制策略与多物理域有限元仿真的电机瞬态振动分析方法。构建了电机软启动过程的电磁力解析模型,用于定性分析低阶电磁力波频率和幅值在启动过程中的变化规律。以直流换流站的主泵电机为研究对象,考虑电机输入和负载之间的耦合影响,建立其软启动过程的仿真模型,为后续的电磁力分析提供初始条件;基于准稳态假设将电机软启动过程看作是多个离散的准稳态工况点的集合;采用二维电磁有限元计算每个准稳态工况点的瞬态磁场,对所有准稳态下的电磁力插值拟合以获取整个启动过程的电磁力,作为振动仿真的激励;通过三维完全法瞬态动力学计算随时空变化的瞬态电磁力所引起的结构振动响应。仿真结果在时域波形和频域成分两方面均与现场实测振动信号较好地吻合,该方法可为分析各型电机在非稳态工况下产生的瞬态振动提供参考。

关键词: 瞬态振动;异步电机;软启动;电磁力

中图分类号: TM343 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202007019 **文章编号:** 0253-987X(2020)07-0158-10



OSID 码

Transient Vibration Analysis of Asynchronous Motor in Soft Startup Process Using Co-Simulation on Control Strategy and Multi-Physical Domain Finite Element Method

ZHAO Jin¹, ZHANG Qing^{1,2}, WEI Xiaohan¹, MA Chengpeng¹

(1. School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 2. Key Laboratory of Education
Ministry for Modern Design and Rotor-Bearing System, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: To reduce the transient vibration induced by electromagnetic force during the soft-startup process of an asynchronous motor, a method for analyzing the transient vibration using co-simulation on control strategy and multi-physical domain finite element method (FEM) is presented. An electromagnetic force analytical model to qualitatively analyze the frequency and amplitude of low-order electromagnetic force in the starting process is constructed. Aiming at the coupling effect between the input and the load, a simulation model of main pump motor during soft-startup process is established to provide initial conditions for subsequent electromagnetic analysis. Based on the quasi-steady state assumption, the motor's soft-startup process is regarded as a set of discrete quasi-steady states. Each transient magnetic field under quasi-steady state is evaluated by the 2D electromagnetic FEM, then all the electromagnetic forces are interpolated to obtain the electromagnetic force in the entire startup process, which will be used

收稿日期: 2019-10-16。 作者简介: 赵津(1990—),男,博士生;张庆(通信作者),男,副教授,博士生导师。 基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2018YFB0606104);国家自然科学基金资助项目(51675405)。

网络出版时间: 2020-05-15

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20200513.1819.016.html>

as the excitation of vibration simulation. The 3D transient dynamics is used to calculate the structure vibration response caused by the electromagnetic forces. The calculated results agree well with the measured vibration signals in both time domain and frequency domain. This method may be taken as a reference for analyzing transient vibration of various types of motors under unsteady working conditions.

Keywords: transient vibration; induction motor; soft-startup; electromagnetic force

通风、给水排水、化工生产、供热散热、油气运输等行业由多台分布式的流体机械为其提供动力。为适应外部不断变化的负荷,需要在不同的时间段对整个系统中驱动流体机械的异步电机进行频繁的启停切换,来调节整个系统的动力输出。虽然异步电机普遍使用的软启动可以实现平滑启动,但仍存在短时间内瞬态冲击过大的问题,瞬态振动峰值往往达到稳态工况3倍以上。在频繁启停切换的流体机组中,频繁的启动冲击对于机组正常运行存在很大隐患。剧烈的瞬态振动加剧了润滑密封元件的磨损,引发了地脚螺栓、销等紧固件的松动,严重时造成机组零部件装配错位。

电机的负载和输入存在耦合影响,两者的变化引起电磁扭矩、气隙电磁力改变,造成电磁振动强度的变化,电机转速也随之波动,诱发机械振动强度的改变。电磁振动是电机振动的主要来源,所以研究软启动过程中时变的激振力变化是分析和控制瞬态振动的关键。目前对于电机的振动分析主要围绕求解电机定转子气隙电磁激振力和电机结构模态分析两方面进行。在求解电磁激振力方面主要有解析法^[1-4]和有限元法^[5-7]。解析法可以较为灵活地构造各种输入、工况,模拟不同故障模式下的电磁力模型,解算速度快、效率高,但是对于复杂电机结构下的电磁力计算精度低,适用于定性分析和预测电磁力的变化趋势。有限元法可以适应电机结构的复杂性、材料的非线性等因素,精确地计算稳态工况下整个气隙中电磁力波,但是对于短时间内变工况下的瞬态电磁力求解,存在运算速度慢、不收敛等问题。另外,电机模态分析则主要应用于结构设计计算^[8-10]和模态实验中。

文献[7-13]以稳态电磁力作为激励,采用谐响应、谱响应等线性动力学分析各型电机稳态下结构振动,非稳态下的电机振动与稳态下的振动不同,引起电机瞬态振动激振力成分则比较复杂,既有气隙中频率和幅值随时间变化的电磁力,也有因控制方式或负载突变引起的波动扭矩等;文献[14-15]通过搭建电机软启动仿真模型研究该过程中的扭矩振荡

现象,但未进一步分析扭矩振荡造成的结构瞬态振动;文献[16]基于准稳态假设方法研究电机驱动的混流泵启动过程瞬态流动特性,未就结构的瞬态振动展开分析;文献[17]利用结构模型简化和状态空间建模技术预测逆变器驱动下的电机变速箱总成直线加速过程的瞬态振动,但激振力是未考虑控制方式简化得到的;文献[18]考虑电机控制策略对动力总成振动的影响,但分析的是稳态下的振动。综上所述,瞬态电磁力的变化受控制方式的影响,而瞬态振动又是由于结构受幅值和频率变化的电磁力激发而产生,所以分析电机软启动过程发生的瞬态振动是一个涉及控制、电磁、结构分析的综合问题。

本文以控制方式为前提,结合解析法和有限元法对换流站散热机组中异步电机启动过程的瞬态振动进行了分析。通过解析模型定性分析低阶电磁力波在启动过程中的变化规律。采用 Simulink 软件仿真电机软启动过程,获取了电压和转速变化;基于准稳态假设理论将软启动过程离散为多个电压和转速组合的准稳态工况点;在 Ansoft 环境下对单个准稳态进行电磁仿真,得到每个准稳态下低阶电磁力的频率和幅值,进而通过有限点的插值拟合的方式获取了整个启动过程低阶电磁力波;以拟合的低阶电磁力波作为激励,在 Ansys Workbench 瞬态动力学平台中计算电机结构在启动过程中的时域振动响应。将仿真得到的振动信号同现场采集到的瞬态振动信号进行了对比。

1 电机启动过程的电磁力解析模型

1.1 异步电机电磁激振力解析模型

异步电机定子的三相对称绕组中接入标准的相位互差 $2\pi/3$ 的正弦交流电后,定子中会产生随时间正弦变化的旋转磁动势,并通过气隙在电机转子中感应出旋转的磁动势。

异步电机定转子间气隙中的合成磁动势为

$$f(\theta, t) = f_0(\theta, t) + \sum_v f_v(\theta, t) + \sum_\mu f_\mu(\theta, t) \quad (1)$$

$$f_0(\theta, t) = F_0 \cos(p\theta - \omega_0 t - \varphi_0) \quad (2)$$

$$f_v(\theta, t) = F_v \cos(v\theta - \omega_0 t - \varphi_v) \quad (3)$$

$$f_\mu(\theta, t) = F_\mu \cos(\mu\theta - \omega_\mu t - \varphi_\mu) \quad (4)$$

$$\omega_\mu = \omega_0 [1 \pm kZ_2(1-s)/p] \quad (5)$$

式中: $f_0(\theta, t)$ 为基波磁动势; $f_v(\theta, t)$ 为定子绕组 v 次谐波磁动势; $f_\mu(\theta, t)$ 为转子绕组 μ 次谐波磁动势; v, μ 分别为定、转子的谐波阶次; θ 为气隙圆周上某点的位置角; ω_0 为基波角频率; ω_μ 为转子谐波角频率; p 为电机极对数; $\varphi_0, \varphi_v, \varphi_\mu$ 分别对应基波磁动势、定子 v 次谐波磁动势、转子 μ 次谐波磁动势的空间相位角; Z_2 为转子齿数; s 为转差率; k 为整数; F_0, F_v, F_μ 分别为基波磁动势幅值、定子 v 次磁动势幅值、转子 μ 次磁动势幅值, 表达式如下

$$\left. \begin{aligned} F_0 &= 1.35NK_{dp0}\dot{I}_0/p \\ F_v &= 1.35NK_{dpv}\dot{I}_1/v \\ F_\mu &= 1.35NK_{dp\mu}\dot{I}'_2/\mu \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

其中 $\dot{I}_0$ 为励磁电流, $\dot{I}_1$ 为定子绕组电流, $\dot{I}'_2$ 为转子绕组电流, $K_{dp0}, K_{dpv}, K_{dp\mu}$ 为绕组系数, 即每个线圈的电动势矢量和与数值和之比, N 为定子每相的串联匝数。

理想状态下, 考虑到异步电机定转子都有齿槽, 气隙磁导可以近似表示为

$$\lambda(\theta, t) \approx \Lambda_0 + \sum_{k_1} \lambda_{k_1} + \sum_{k_2} \lambda_{k_2} + 1/(\Lambda_0 \sum_{k_1} \sum_{k_2} \lambda_{k_1 k_2}) \quad (7)$$

式中: Λ_0 为磁导中恒定的部分; λ_{k_1} 为定子开槽而转子光滑的谐波磁导; λ_{k_2} 为转子开槽而定子光滑的谐波磁导; $\lambda_{k_1 k_2}$ 为定转子都开槽时相互作用引起的谐波磁导; k_1, k_2 均为正整数。

忽略定、转子开槽相互作用引起的磁导气隙, 则气隙圆周上某点位置角 θ 处磁场密度瞬态值为

$$\begin{aligned} b(\theta, t) &= f(\theta, t)\lambda(\theta, t) \approx \left[f_0(\theta, t) + \sum_v f_v(\theta, t) + \sum_\mu f_\mu(\theta, t) \right] \left[\Lambda_0 + \sum_{k_1} \lambda_{k_1} + \sum_{k_2} \lambda_{k_2} \right] \approx \\ &\{ F_0 \Lambda_0 \cos(p\theta - \omega_0 t - \varphi_0) + \sum_v F_v \Lambda_0 \cos(v\theta - \omega_0 t - \varphi_v) + \sum_\mu F_\mu \Lambda_0 \cos(\mu\theta - \omega_\mu t - \varphi_\mu) \} + \\ &\sum_{k_1} F_0 \Lambda_{k_1} \cos[(\pm k_1 Z_1 + p)\theta - \omega_0 t - \varphi_0]/2 + \\ &\sum_{k_2} F_0 \Lambda_{k_2} \cos\{(\pm k_2 Z_2 + p)\theta - \\ &(\pm k_2 Z_2(1-s)/p)\omega_0 t - \varphi_0\}/2 \end{aligned} \quad (8)$$

以上气隙磁密中, 影响最明显的是齿谐波^[19], 所以当 $v = v_Z = q_1 Z_1 + p, \mu = \mu_Z = q_2 Z_2 + p$ (q_1, q_2 均为整数) 时, 式(8)可写为

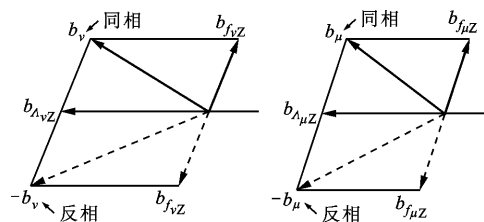
$$\begin{aligned} b(\theta, t) &\approx b_1(\theta, t) + b_{fv_Z}(\theta, t) + b_{f\mu_Z}(\theta, t) + \\ &b_{\Lambda v_Z}(\theta, t) + b_{\Lambda \mu_Z}(\theta, t) = F_0 \Lambda_0 \cos(p\theta - \omega_0 t - \varphi_0) + \sum_{v_Z} F_{v_Z} \Lambda_0 \cos(v_Z \theta - \omega_0 t - \varphi_v) + \\ &\sum_{\mu_Z} F_{\mu_Z} \Lambda_0 \cos(\mu_Z \theta - \omega_\mu t - \varphi_\mu) + \sum_{v_Z} F_0 \Lambda_{k_1} \cos(v_Z \theta - \omega_0 t - \varphi_0)/2 + \sum_{\mu_Z} F_0 \Lambda_{k_2} \cos(\mu_Z \theta - \omega_\mu t - \varphi_0)/2 \end{aligned} \quad (9)$$

式中基波磁场 $b_1(\theta, t)$ 、定子绕组齿谐波 $b_{fv_Z}(\theta, t)$ 、转子磁动势齿谐波 $b_{f\mu_Z}(\theta, t)$ 、定子磁导齿谐波 $b_{\Lambda v_Z}(\theta, t)$ 和转子磁导齿谐波 $b_{\Lambda \mu_Z}(\theta, t)$ 构成了气隙中的主要磁场。定子绕组齿谐波与定子磁导齿谐波为同阶次谐波, 频率、极数相同, 可以矢量叠加为 Σb_v , 同理转子磁动势齿谐波和磁导齿谐波也可叠加为 Σb_μ , 定转子谐波矢量叠加如图 1 所示。图 1 中 $b_v = B_{v_Z} \cos(v_Z \theta - \omega_1 t - \varphi_{0v})$, $b_\mu = B_{\mu_Z} \cos(\mu_Z \theta - \omega_\mu t - \varphi_{0\mu})$ 。由于定子绕组齿谐波、定子磁导齿谐波为同相或反相的相位关系, 同向时两者相位差为 $|\varphi_0 - \varphi_v|$; 反向时两者的相位差为 $|\varphi_0 + \varphi_v|$ 。与此类似, 转子磁动势齿谐波与转子磁导齿谐波的相位为 $|\varphi_0 \pm \varphi_\mu|$, 叠加后的结果如下式

$$b(\theta, t) = B_0 \cos(p\theta - \omega_0 t - \varphi_0) + \sum_{v_Z} B_{v_Z} \cos(v_Z \theta - \omega_0 t - \varphi_{0v}) + \sum_{\mu_Z} B_{\mu_Z} \cos(\mu_Z \theta - \omega_\mu t - \varphi_{0\mu}) \quad (10)$$

其中

$$\left. \begin{aligned} B_0 &= F_0 \Lambda_0 \\ B_{v_Z} &= \sqrt{F_v^2 \Lambda_0^2 + F_0^2 \Lambda_{k_1}^2 / 4 + F_v F_0 \Lambda_0 \Lambda_{k_1} \cos(\varphi_0 \pm \varphi_v)} \\ B_{\mu_Z} &= \sqrt{F_\mu^2 \Lambda_0^2 + F_0^2 \Lambda_{k_2}^2 / 4 + F_\mu F_0 \Lambda_0 \Lambda_{k_2} \cos(\varphi_0 \pm \varphi_\mu)} \end{aligned} \right\} \quad (11)$$



(a) 定子谐波矢量叠加 (b) 转子谐波矢量叠加
图 1 定转子绕组齿谐波与磁导齿谐波矢量叠加

依据麦克斯韦应力张量法, 定转子气隙中圆周上任意一点单位面积上的径向电磁力为

$$p_r(\theta, t) = [b_r^2(\theta, t) - b_t^2(\theta, t)]/2\mu_0 \quad (12)$$

式中 μ_0 为真空磁导率。在异步电机中定子铁芯的相对磁导率远高于气隙的相对磁导率, 切向磁密 $b_t(\theta, t)$ 远小于径向磁密 $b_r(\theta, t)$ ($b_r > 10b_t$), 所以可

忽略法向磁密的影响^[20],式(12)可以简化为

$$p_r(\theta,t) \approx b_r^2(\theta,t)/2\mu_0 \tag{13}$$

将式(10)代入式(13)中,忽略振动阶次较高、幅值较小的力波分量,同时略去不产生振动的恒定分量得到下式

$$p_r(\theta,t) \approx \left\{ \frac{1}{4\mu_0} B_0^2 \cos(2p\theta - 2\omega_0 t - 2\varphi_0) \right\} + \left\{ \frac{1}{2\mu_0} \sum_{v_z} \sum_{\mu_z} B_{v_z} B_{\mu_z} \cos[(\mu_z \pm v_z)\theta - (\omega_\mu + \omega_1)\omega_0 t - (\varphi_{0v} \pm \varphi_{0\mu})] \right\} \tag{14}$$

电磁力波由电源频率基波以及定子和转子的齿谐波相互作用所产生的力波两部分组成。电磁力波的频率、阶次、幅值见表 1。

表 1 引起异步电机电磁振动的电磁力波频率、阶次和幅值

电磁力波成分	阶次	频率	幅值
基波产生的电磁力	$2p$	$2f_0$	$B_0^2/4\mu_0$
定转子齿谐波相互作用产生的电磁力	$\frac{ u_z+v_z }{ u_z-v_z } \frac{[kZ_2(1-s)/p+2]f_0}{[kZ_2(1-s)/p]f_0}$	$\frac{B_{v_z}B_{\mu_z}}{2\mu_0}$	

f_0 ——电源频率。

表 1 中定转子齿谐波相互作用产生的电磁力波中,力波的阶数越低所引起的振动和噪声也越大。电机定子铁芯振动幅值 Δd 与电磁力阶次 $n=|\mu_z \pm v_z|$ 的 4 次方成反比,如下式

$$\Delta d \propto 1/n^4 \tag{15}$$

因此,引起电机振动的主要是 0 阶到 4 阶的低阶次的周向电磁力谐波。

1.2 异步电机软启动过程瞬态电磁力的定性分析

异步电机运行时的等效电路和相量图如图 2 所示,电机软启动主要是通过采用线性减小触角的方式,使电机定子侧的输入电压 $\dot{U}_1$ 逐渐上升到额定电压。结合电机运行时的 Γ 形等效电路可定性分析电机软启动过程中励磁电流 $\dot{I}_0$ 、定子侧电流 $\dot{I}_1$ 、转子侧电流 $\dot{I}'_2$ 的变化情况, $\dot{I}_0$ 、 $\dot{I}_1$ 、 $\dot{I}'_2$ 之间关系如图 2b 所示, $\dot{I}_0$ 、 $\dot{I}_1$ 、 $\dot{I}'_2$ 的计算式如下

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_0 &= \dot{U}_1 / ((R_m + X_m) + (R_1 + X_1)) \\ |\dot{I}_0| &= U_1 / \sqrt{(R_1 + R_m)^2 + (X_1 + X_m)^2} \\ \dot{I}'_2 &= \dot{U}_1 / ((R_1 + jX_1) + (R'_2/s + jX'_2)) \\ |\dot{I}'_2| &= U_1 / \sqrt{(R_1 + R'_2/s)^2 + (X_1 + X'_2)^2} \\ \dot{I}_1 + \dot{I}'_2 &= \dot{I}_0 \\ |\dot{I}_1| &= \sqrt{|\dot{I}_0|^2 + |\dot{I}'_2|^2 + 2|\dot{I}_0||\dot{I}'_2|\cos\theta} \end{aligned} \right\} \tag{16}$$

在 Γ 形等效电路中 $\dot{U}_1$ 为输入电压; X_1 为定子绕组漏电抗; X'_2 为转子绕组漏电抗; X_m 为励磁电抗; R_1 为定子电阻; R'_2 为转子电阻; R_m 为励磁电阻。

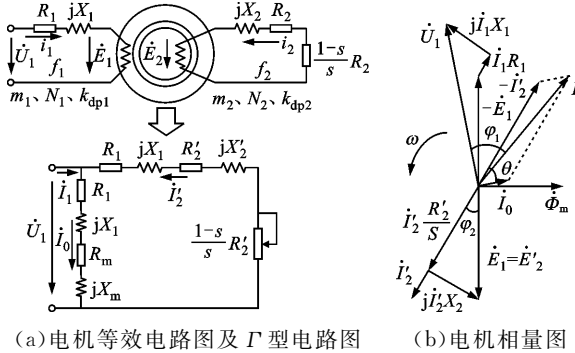


图 2 电机运行时等效电路图和相量图

从表 1 可知,基波产生的电磁力的幅值为 $B_0^2/4\mu_0$,定转子齿谐波相互作用产生的力波幅值为 $B_{v_z}B_{\mu_z}/2\mu_0$ 。式(11)中 $|\varphi_0 \pm \varphi_v|$ 近似为 $\dot{U}_1$ 与 $\dot{I}_1$ 的相位角 φ_1 , $|\varphi_0 \pm \varphi_\mu|$ 近似为 $\dot{E}'_2$ 与 $\dot{I}'_2$ 的相位角 φ_2 ,所以磁动势的幅值和绕组中电流的大小相关,即 $F_0 \propto \dot{I}_0$, $F_v \propto \dot{I}_1$, $F_\mu \propto \dot{I}'_2$ 。

由式(11)可得

$$\left. \begin{aligned} B_{v_z}B_{\mu_z} &\geq (F_v\Lambda_0 - F_0\Lambda_{k_1}/2)(F_\mu\Lambda_0 - F_0\Lambda_{k_2}/2) \\ B_{v_z}B_{\mu_z} &\leq (F_v\Lambda_0 + F_0\Lambda_{k_1}/2)(F_\mu\Lambda_0 + F_0\Lambda_{k_2}/2) \end{aligned} \right\} \tag{17}$$

因为 $F_0 \propto \dot{I}_0$, $F_v \propto \dot{I}_1$, $F_\mu \propto \dot{I}'_2$,所以基波产生的电磁力波幅值 $B_0^2/4\mu_0 \propto \dot{I}_0^2$,齿谐波相互作用产生的电磁力波幅值 $B_vB_\mu/2\mu_0 \propto \dot{I}_1\dot{I}'_2$ 。软启动过程中电磁力波幅值为 $B_0^2/4\mu_0$ 和 $B_{v_z}B_{\mu_z}/2\mu_0$,与励磁电流 $\dot{I}_0$ 、定子电流 $\dot{I}_1$ 、转子电流 $\dot{I}'_2$ 相关。电流变化引起电磁力波的幅值改变,进而直接影响电机的振动强度。

软启动过程中电磁力波的频率和转差率有关,见表 1。电机软启动过程中转速不断上升,转差率 s 逐渐变小,电磁力波的频率 $[kZ_2(1-s)/p+2]f_0$ (阶次为 $|u_z+v_z|$) 和 $[kZ_2(1-s)/p]f_0$ (阶次为 $|u_z-v_z|$) 随转速增大而增大。电磁力波的频率直接影响电机振动的频率。

从解析式可以定性得知,软启动过程中电机的输入电流 $\dot{I}_1$ 和转差率 s 是导致低阶电磁力波幅值和频率变化的根本原因,时变的电磁力波直接影响异步电机瞬态振动形式。

2 电机软启动过程的瞬态振动仿真

特高压直流换流站中主泵系统用于给额定工作电流高达 4 500 A 换流阀降温,如果散热不及时,将导致晶闸管、电抗器等器件因高温而烧毁。目前普

遍采用双泵互为备份的冗余设计,通过定期切换驱动主泵的异步电机运行,保证散热的可靠性。

以某特高压直流换流站散热机组作为研究对象,图 3a 为散热机组中两台互为备份的循环主泵,驱动电机需要经常进行启停切换,伴随电机软启动过程产生很大的瞬态振动冲击,所以本文针对该机组中异步电机软启动过程产生的瞬态振动进行研究。

通过电磁力的解析式仅对其进行了定性的分析,本文进一步采用联合仿真的方式对软启动过程中电磁力波所引起的结构振动进行了定量仿真,具体仿真流程见图 3b。

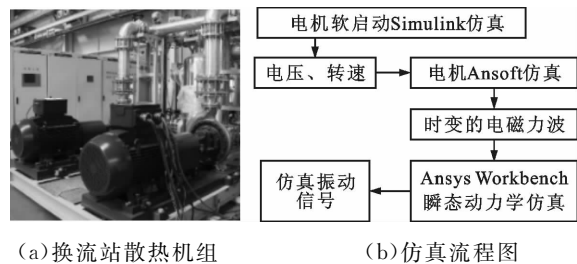


图 3 换流站散热机组及仿真流程

2.1 基于 Simulink 软件仿真电机的软启动过程

为近似获取电机软启动过程中定子侧输入电压和电机转速,采用 Simulink 模拟电机的软启动过程。换流站散热机组异步电机采用三角形的绕组连接方式,软启动电压控制方式为斜坡升压。异步电机参数及软启动参数见表 2,电机的 Simulink 仿真参数见表 3。

表 2 换流站散热机组的异步电机及软启动参数

参数	数值
启动初始电压占额定电压的百分比	40%
软启动时间/s	3
定子槽数	48
转子槽数	44
额定电压/V	380
输出功率/kW	110
额定转矩/(N·m)	1 287
额定电流/A	366
额定转速/(r·min ⁻¹)	1 484

采用晶闸管三相调压器给电机供电时,晶闸管的移相范围受到一定的限值。控制角过大,调压器输出电压过低,电机启动转矩太小,电机无法启动。控制角小于功率因数角会失去调压的作用,输出全电压。为避免触发角和功率因数角的交叠,从电流半个周期后沿向前导通。

因为电机带负载启动,为防止电机堵转,将启动

表 3 异步电机的 Simulink 仿真参数

参数	数值
转动惯量/(kg·m ²)	2.3
极对数	2
摩擦系数	0.054 21
互感/H	0.010 38
定子绕组电阻/Ω	0.038 55
定子绕组电感/H	0.000 389
转子绕组电阻/Ω	0.010 91
转子绕组漏感/H	0.000 210

电压设置为额定电压的 35%。晶闸管的触发角和导通角之间存在相互制约,所以需要在控制环节中设置函数匹配环节,匹配关系如下式

$$F(u) = 6 - u \tag{18}$$

式中: u 为积分器的输出。能使电机启动的最小控制电压为 6 V。

散热机组中的异步电机通过拖动离心泵,驱动管路中的液体对换流站中的核心元件进行散热。电机仿真模型中的负载是离心泵施加给电机的反力矩,通过 Simulink 中的 systemFunction 函数将负载施加给电机。根据工作介质不变的同一泵相似定律,离心泵不同转速下叶轮上的扭矩之比近似等于转速之比的平方,所以通过稳定转速下的扭矩推算瞬态转速下的扭矩如下式

$$T = (n/n_s)^2 T_s \tag{19}$$

式中: n_s 为离心泵稳态下的转速; T_s 为稳态下的扭矩; n 为离心泵某一时刻的瞬时转速; T 为瞬时转速 n 时对应的扭矩。

在 Simulink 中搭建的异步电机软启动模型如图 4 所示。图 5 为通过仿真得到的异步电机软启动过程中定子侧输入电压(有效值)和电机转速的变化。

2.2 基于 Ansoft 仿真电机软启动过程的电磁力波

散热机组中异步电机的型号为 Y315S-4,依据表 1 计算引起该电机振动的低阶电磁力波的阶次和频率,结果见表 4、表 5。表 4 中 $v = (6k_1 + 1)p, \mu = k_2 Z_2 + p$,其中: $k_1、k_2$ 均为整数。从表 4 可以看出,对振动影响显著的低阶电磁力阶次主要是 4 阶。电机整个软启动瞬态过程中除了基波形成的电磁力波频率一直在 100 Hz 左右波动外,其他阶次电磁力波频率均随着软启动过程中电机转差率 s 而连续变化,几个主要影响振动的 4 阶电磁力波频率从启动开始由 0 逐渐上升,待启动结束转速稳定后,频率稳定在 1 100、2 200 Hz 附近。

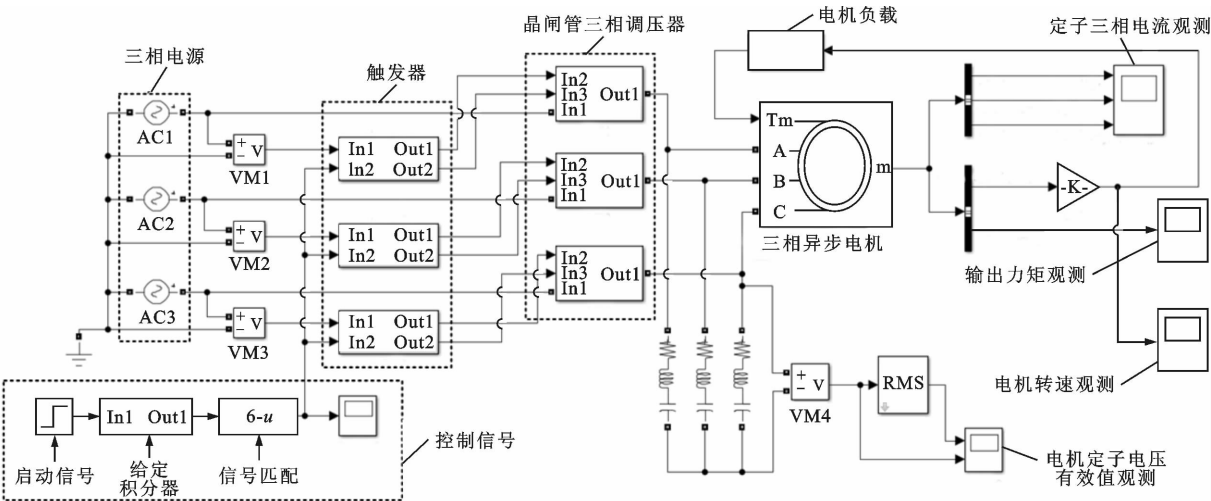


图 4 异步电机软启动 Simulink 仿真模型

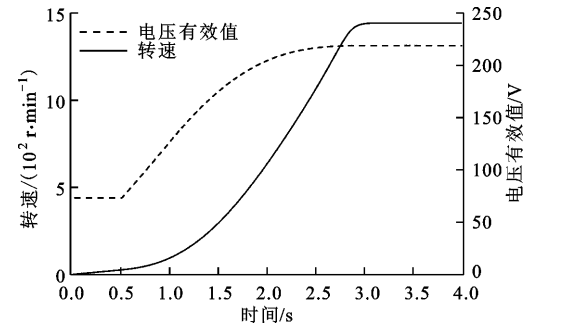


图 5 软启动过程定子侧输入电压有效值和电机转速的变化

表 4 定转子齿谐波相互作用形成的低阶电磁力波阶次

电磁力波阶次	定转子齿谐波的组合
0	$v = -46, \mu = 46; v = 86, \mu = -86; v = -130, \mu = -130; v = 134, \mu = 134; v = -178, \mu = 178$
4	$v = 2, \mu = 2; v = -38, \mu = -42; v = -46, \mu = -42; v = 50, \mu = -46; v = -82, \mu = -86; v = 86, \mu = 90; v = -94, \mu = 90; v = 134, \mu = -130; v = -130, \mu = 134; v = -178, \mu = -174; v = 182, \mu = 178$

通过 Simulink 仿真得到了电机软启动过程中的电压有效值和转速。将电机软启动看作是离散的多个工况点的组合,把启动过程划分为如图 6 所示的 36 个准稳态。在每个准稳态下都有相应的转速和电压有效值,为后续的电磁仿真提供初始条件。

在 Ansoft Maxwell 软件的电磁仿真环境下,对每一个准稳态设置相应的转速作为初始条件,施加对应的激励电压,细化有限元网格,设置合适的仿真

表 5 定转子齿谐波相互作用形成的低阶电磁力波频率

电磁力波频率	定转子齿谐波的组合
100	$v = 2, \mu = 2$
1 100(1-s)	$v = 50, \mu = 46; v = -46, \mu = 42$
1 100(1-s)-2f ₀	$v = 38, \mu = -42$
1 100(1-s)+2f ₀	$v = -46, \mu = 46$
2 200(1-s)	$v = 86, \mu = 90; v = -82, \mu = -86$
2 200(1-s)-2f ₀	$v = 86, \mu = -86$
2 200(1-s)+2f ₀	$v = -94, \mu = 90$
3 300(1-s)	$v = 134, \mu = 134; v = -130, \mu = -130$
3 300(1-s)-2f ₀	$v = 134, \mu = -130$
3 300(1-s)+2f ₀	$v = -130, \mu = 134$
4 400(1-s)	$v = 182, \mu = 178; v = -178, \mu = -174$
4 400(1-s)+2f ₀	$v = -178, \mu = 178$

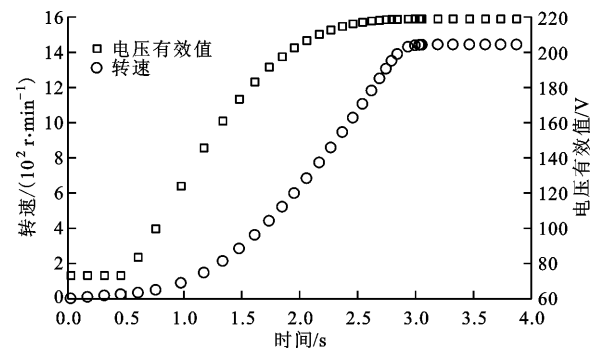


图 6 在转速和电压曲线上取对应的 36 点作为 36 个准稳态

时长和步长,进行电机电磁有限元仿真。仿真完成后,在后处理中提取气隙磁场,求取该准稳态下的低阶电磁力。将所有准稳态下离散的仿真结果进行插

值拟合以近似获取整个启动过程中随时间连续变化的瞬态电磁力,分析过程如图7所示。

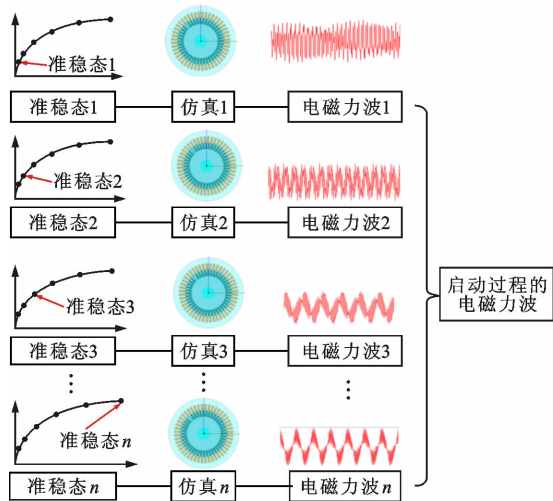


图7 采用离散的准稳态叠加方式获取瞬态电磁力波的过程

在每个准稳态的后处理环节中提取电机气隙磁场密度,根据麦克斯韦应力张量法计算气隙电磁力,对其进行FFT变换,从频谱中提取出对电机振动影响显著的4阶电磁力波的幅值和频率。最后,对所有离散的准稳态下的电磁力波幅值和频率进行组合,以分析其变化趋势。定转子齿谐波相互作用所产生的4阶电磁力波的幅值和频率随时间的变化如图8、图9所示。基波产生的4阶基波电磁力波的幅值和频率随时间的变化如图10所示。

2.3 电磁力作用下的电机结构瞬态振动分析

瞬态动力学分析为时间历程分析,用于确定随时间变化的载荷作用下的结构响应。基于有限元法的结构振动非线性瞬态动力学的控制方程如下

$$Mu + Cu + Ku = F(t) \quad (20)$$

通过对结构施加时变的载荷 $F(t)$,求解结构上节点加速度 u 在时间历程上的变化,以此了解结构在瞬态激振力下的振动形式。

2.2节通过 Ansoft 仿真得到了软启动过程中

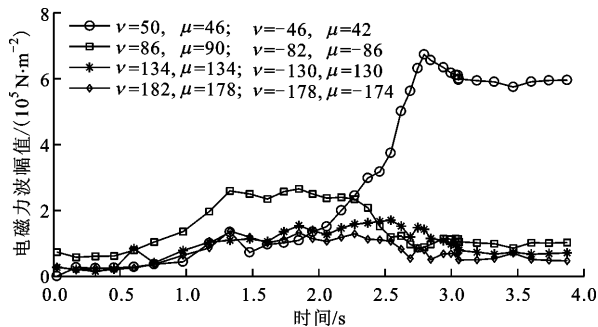


图8 齿谐波相互作用产生的4阶电磁力波幅值随时间的变化

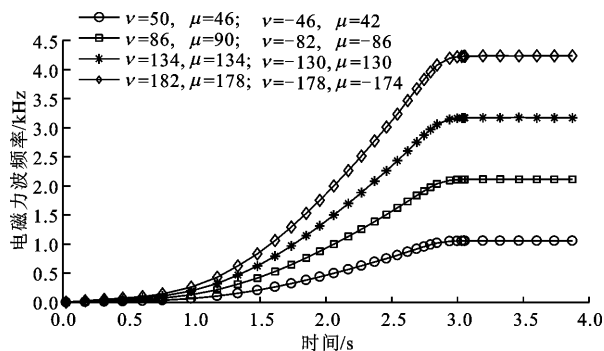


图9 齿谐波相互作用产生的4阶电磁力波频率随时间的变化

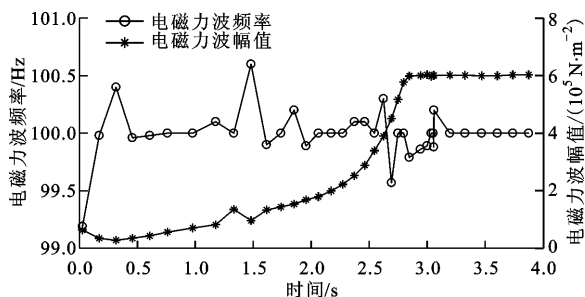
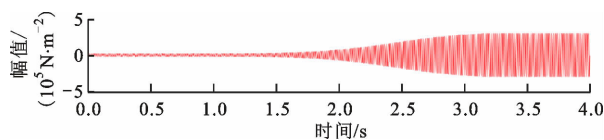
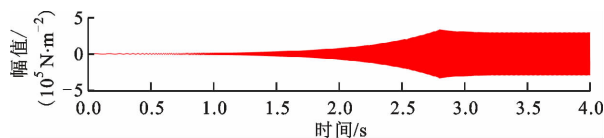


图10 基波产生的4阶电磁力波幅值和频率随时间的变化

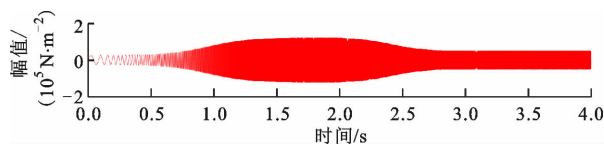
多个离散的准稳态下的低阶电磁力波的幅值和频率,采用幂函数、logistic 函数、线性函数等对启动过程中低阶电磁力离散的频率点和幅值点进行分段插值拟合,最后作出了启动过程中随时间连续变化的定转子齿谐波相互作用产生的4阶电磁力波和基波产生的4阶电磁力波,如图11所示。为电机启动过



(a)基波产生的4阶电磁力波



(b) $v=50, \mu=46$ 和 $v=-46, \mu=42$ 两种情况下齿谐波相互作用产生的4阶电磁力波



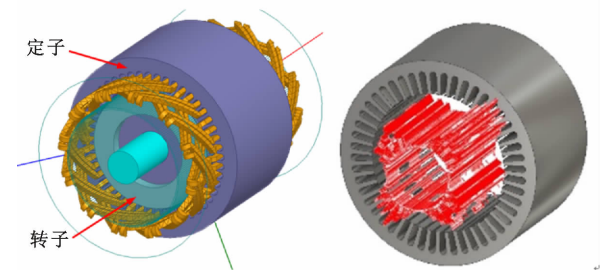
(c) $v=86, \mu=90$ 和 $v=-82, \mu=-86$ 两种情况下齿谐波相互作用产生的4阶电磁力波

图11 拟合后的4阶不同频率的电磁力波

程产生的瞬态振动分析提供了激励源 $F(t)$ 。

在已知激振力 $F(t)$ 基础上,以式(20)为控制方程,将电机结构进行有限元离散,构造电机结构质量矩阵 M 、刚度矩阵 K ,通过多个时间步的连续求解获取结构振动形式 u 。在 Ansys Workbench 瞬态动力学环境下进行电机启动过程的结构动力学时间历程仿真,以分析时变的瞬态电磁力波对电机结构振动形式的影响。

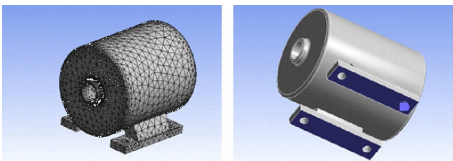
图 12a 是异步电机内部沿轴线的三维结构图,电机运行时定子和转子气隙中会产生如图 12b 所示的时间和空间上变化的电磁力波。时变的电磁力波作用在电机定子齿的内表面最终引起电机结构的振动。



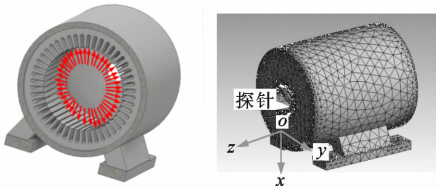
(a)电机三维结构 (b)定子齿表面某一时刻的电磁力波
图 12 电机三维结构及空间分布的电磁力波

为减少瞬态动力学仿真中的计算量,在电机模型中去掉了对仿真结果影响不大的外壳表面的散热肋条、尾部的散热风扇、风扇罩及电机接线盒等附件。

采用完全法从时域求解瞬态动力学的控制方程。瞬态动力学中时间步长的选择决定了时域的求解精度,因此时间步长的选择要小到足够获取结构的动力响应。本次仿真的时间步长设置为 0.002 s,阻尼选择为瑞利阻尼。将电机的外壳作为分析对象,在 Ansys Workbench 瞬态动力学环境下对其进行仿真分析,如图 13 所示。将电机的端盖、外壳和定子视为一体,材质选用灰铸铁,采用非结构化的四面体网格对电机的外壳进行网格划分,并且在结构复杂的部位进行了网格局部加密处理,网格划分的结果见图 13a;同时对电机底座施加如图 13b 的固定约束;在电机定子齿的内表面施加图 11 中的频率



(a)电机结构网格划分 (b)电机结构约束装置



(c)定子齿表面电磁力的施加 (d)仿真信号的探针位置
图 13 电机结构瞬态动力学仿真

和幅值随时间变化的电磁力波,如图 13c 所示。求解结束后在电机外壳轴承座处布置测点,探针位置如图 13d 所示。从该监测点捕捉到的振动加速度如图 14 所示。

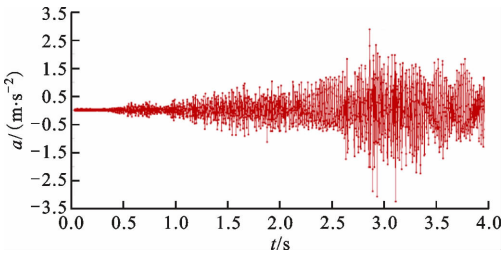


图 14 探针处 y 向的振动加速度信号

3 现场实测振动信号的对比分析

为验证仿真结果的正确性,通过采集电机软启动过程瞬态振动加速度信号同仿真得到的信号进行对比。试验中异步电机拖动离心泵带负载启动,为防止电机堵转,启动初始电压设为额定电压的 35%。整个软启动过程采用斜坡升压的启动方式,使电机的输入电压由 150 V 逐步上升到额定电压 380 V。整个软启动过程的持续时间为 3 s。散热机组中采集电机振动信号的测点的水平方向布置加速度传感器。采用的是 OROS 公司型号为 Or35 数据采集与分析仪,传感器使用的是 PCB 公司的 352C68 加速度传感器,采样频率设置为 10 240 Hz。

本文对 3 台机组中电机软启动过程的振动信号进行了采集,采集持续时长为 5 s。图 15 为机组实测信号和仿真信号的对比。图 15 中实测信号 1、2、3 为 3 台电机软启动过程的瞬态振动加速度信号,可以看到在启动过程中,振动的幅值逐渐增大,在电机转速接近同步转速的时刻,振动的幅值达到最大,然后幅值逐渐降低,待电机启动过程结束运行稳定后,电机的振动幅值趋于稳定。图 15 中仿真信号的时域波形的变化趋势与实测信号相同,并且仿真信号振动幅值的数量级与实测信号也一致(仿真的过程中仅考虑了电磁力波中对振动贡献较大的部分,而且还忽略了电机转子加速、扭矩输出波动等影响,

所以仿真得到的振动幅值要比实测的小),所以电机启动过程产生的瞬态振动主要是受幅值和频率随时间变化的电磁力波激发而产生。

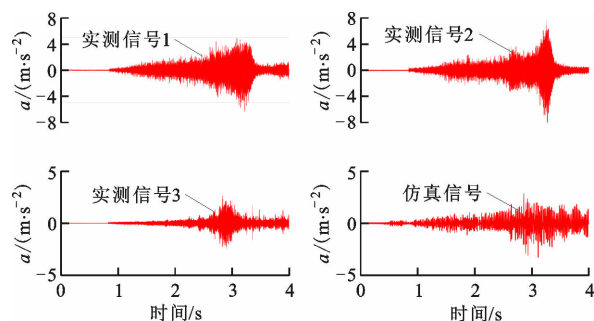
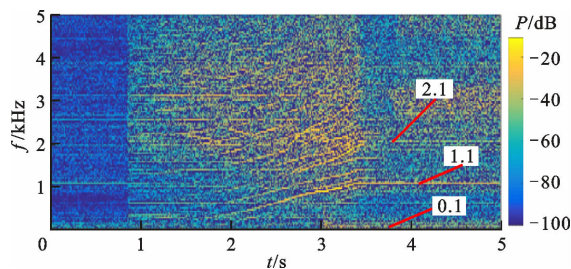
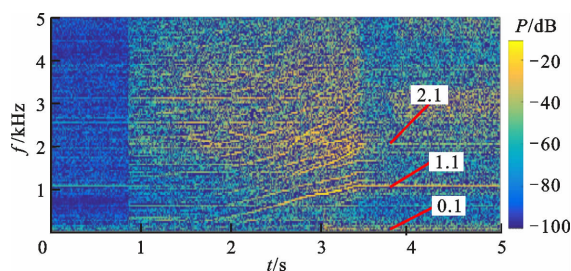


图15 机组实测信号和仿真信号的对比

为进一步从频域验证电机软启动过程瞬态振动的起因,选取对第1组和第2组电机水平方向的加速度信号进行短时傅里叶变换,采用汉宁窗,时间窗长度为256个点,相邻两数据段的重叠点数为250,得到电机软启动过程的STFT时频谱,如图16所示。



(a) 实测信号1



(b) 实测信号2

图16 电机软启动过程的STFT时频谱

整个软启动过程中基波形成的电磁力波瞬时频率一直在100 Hz左右小幅波动,其幅值随转速上升,导致结构振动幅值逐渐增大。定转子齿谐波相互作用产生的4阶电磁力波(稳态频率1 100 Hz和2 100 Hz附近)的频率随转子的转速而上升,和前文表4、5中采用解析式推导的结果相符,电磁力波幅值的不断上升进一步加剧了结构振动。待电机加速结束运行稳定后,时频谱图上的振动能量主要集中在100 Hz、(1 100±100) Hz、(2 100±100) Hz 3

个频带附近,而电机转频25 Hz附近的能量相对较低。这证明了在软启动过程中引起电机瞬态振动的主要激振力成分是频率和幅值随时间变化的4阶电磁力波,电机的瞬态振动形式与电磁力的时域变化具有一定的相关性。

4 结 论

本文通过解析计算和数值仿真的方式验证了异步电机定子气隙中短时间内幅值和频率快速变化的低阶(4阶)电磁力波是造成其启动过程瞬态振动的主要原因,建立了异步电机电磁力波的解析模型,定性分析得到电机转速和输入电压是影响电磁力波的频率和幅值变化的主要因素。采用联合控制策略和多物理域有限元仿真的方式,对电机启动过程的振动加速度进行了仿真。结合现场采集的多组振动信号,实测信号时域波形变化趋势与仿真信号相同,并且实测信号时频谱中能量较大的频率成分变化趋势同仿真的低阶电磁力波的频率变化也一致。

在不改变电机现有内部结构的前提下,可以通过控制软启动过程中电压、电流变化,改变低阶电磁力波频率和幅值,进而削弱电机软启动过程中的瞬态振动。

本文所采用的控制-电磁-结构一体的仿真方法,也可用于解释其他类型电机非稳态工况下产生的瞬态振动。另外,通过对电机结构做更为精细的有限元建模,可进一步对电机非稳态工况下产生的瞬态振动进行精确数值预测。

参考文献:

- [1] YANG Z, WANG S, HONG J, et al. Analysis of electromagnetic exciting force and vibration of rotating armature permanent magnet synchronous motor [J]. The Journal of Engineering, 2018(17): 1903-1908.
- [2] 曹海翔, 沈靖文, 王善铭, 等. 永磁直流电机定子的振动分析 [J]. 清华大学学报(自然科学版), 2017, 57(1): 89-94.
- [3] CAO Haixiang, SHEN Jingwen, WANG Shanming, et al. Analyses of permanent magnet DC motor stator vibrations [J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2017, 57(1): 89-94.
- [3] 陈益广, 韩柏然, 沈勇环, 等. 永磁同步推进电机电磁振动分析 [J]. 电工技术学报, 2017, 32(23): 16-22.
- CHEN Yiguang, HAN Boran, SHEN Yonghuan, et al. Electromagnetic vibration analysis of permanent magnet synchronous propulsion motor [J]. Transac-

- tions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(23): 16-22.
- [4] XIE Bang, WANG Shiyu, WANG Yaoyao, et al. Magnetically induced rotor vibration in dual-stator permanent magnet motors [J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2015, 347(7): 184-199.
 - [5] CHO S, HWANG J, KIM C W. A study on vibration characteristics of brushless DC motor by electromagnetic-structural coupled analysis using entire finite element model [J]. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2018, 33(4): 1712-1718.
 - [6] 王玓, 祝长生, 符嘉靖. 基于有限元的异步电机电磁振动分析 [J]. *振动与冲击*, 2012, 31(2): 140-144.
WANG Ding, ZHU Changsheng, FU Jiajing. Electromagnetically excited vibration analysis for an asynchronous electrical machine with finite element method [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2012, 31(2): 140-144.
 - [7] MARTINEZ J, BELAHCEEN A, DETONI J G. A 2D magnetic and 3D mechanical coupled finite element model for the study of the dynamic vibrations in the stator of induction motors [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2016(66/67): 640-656.
 - [8] 宾光富, 曾求洪, 王钢, 等. 基于有限元模型的电机零部件与整机结构振动关联特性 [J]. *电机与控制学报*, 2016, 20(11): 101-106.
BIN Guangfu, ZENG QiuHong, WANG Gang, et al. Structural vibration correlation feature analysis for parts and whole-machine of motor based on finite element model [J]. *Electric Machines and Control*, 2016, 20(11): 101-106.
 - [9] 代颖, 崔淑梅, 宋立伟. 车用电机的有限元模态分析 [J]. *中国电机工程学报*, 2011, 31(9): 100-104.
DAI Ying, CUI Shumei, SONG Liwei. Finite element method modal analysis of driving motor for electric vehicle [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2011, 31(9): 100-104.
 - [10] 韩伟, 贾启芬, 邱家俊. 异步电机定子的振动与模态分析 [J]. *振动与冲击*, 2012, 31(17): 91-94.
HAN Wei, JIA Qifen, QIU Jiajun. Vibration and modal analysis for stator of an induction motor [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2012, 31(17): 91-94.
 - [11] WANG Shanming, HONG Jianfeng, SUN Yuguang, et al. Analysis and experimental verification of electromagnetic vibration mode of PM brush DC motors [J]. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2018, 33(3): 1411-1421.
 - [12] SZOLC T, KONOWROCKI R, MICHAJLOW M, et al. An investigation of the dynamic electromechanical coupling effects in machine drive systems driven by asynchronous motors [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2014, 49(1/2): 118-134.
 - [13] DONG Qichao, LIU Xintian, QI Hongzhong, et al. Analysis and evaluation of electromagnetic vibration and noise in permanent magnet synchronous motor with rotor step skewing [J]. *Science China: Technological Sciences*, 2019, 62(5): 839-848.
 - [14] 孙津济, 房建成, 王建民. 异步电动机软启动过程中的振荡 [J]. *电工技术学报*, 2007(2): 15-21.
SUN Jinji, FANG Jiancheng, WANG Jianmin. Oscillation in soft-starting of induction motor [J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2007(2): 15-21.
 - [15] 王毅, 赵凯岐, 徐殿国. 电机软启动控制系统中功率因数角的研究 [J]. *中国电机工程学报*, 2002(8): 83-88.
WANG Yi, ZHAO Kaiqi, XU Dianguo. Research on displacement angle in the control system of motor soft starter [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2002(8): 83-88.
 - [16] 李伟, 季磊磊, 施卫东, 等. 基于准稳态假设的混流泵启动特性分析 [J]. *农业工程学报*, 2016, 32(7): 86-92.
LI Wei, JI Leilei, SHI Weidong, et al. Starting characteristic of mixed-flow pump based on quasi-steady state assumption [J]. *Transactions of the CSAE*, 2016, 32(7): 86-92.
 - [17] TANABE Y, WATANABE M, HARA T, et al. Transient vibration simulation of motor gearbox assembly driven by a PWM inverter [C]//*Proceedings of the Inter-Noise and Noise-Con Congress and Conference*. Reston, VA, USA: Institute of Noise Control Engineering, 2017: 263-271.
 - [18] 于蓬, 章桐, 余瑶, 等. 考虑电机控制策略影响的电动车动力总成振动分析 [J]. *振动与冲击*, 2016, 35(19): 50-57.
YU Peng, ZHANG Tong, YU Yao, et al. Vibration analysis of electric vehicle powertrain considering motor control strategy [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2016, 35(19): 50-57.
 - [19] 周璞. 电机电磁激励特性及结构振动响应分析研究 [D]. 北京: 中国舰船研究院, 2018: 18-20.
 - [20] 周桂煜. 三相感应电机电磁噪声、电流谐波和附加损耗的分析与抑制 [D]. 杭州: 浙江大学, 2018: 47-48.

(编辑 武红江)