DOI: 10.3901/JME.2020.17.145

初始静偏心与重力载荷对动车牵引电机转子轴心轨迹的影响*

周生通¹ 朱经纬^{1,2} 肖乾¹ 郭维年¹ 周新建¹

(1. 华东交通大学机电与车辆工程学院 南昌 330013;

2. 中国铁路广州局集团有限公司株洲车站 株洲 412000)

摘要: 针对重力载荷下具有初始静偏心的动车牵引电机转子振动特性, 首先利用磁势乘磁导法和 Maxwell 应力张量法给出了具有静动气隙偏心故障和任意磁极对数的电机空载/负载运行下的不平衡磁拉力统一解析表达式, 然后采用 Jeffcott 模型建立了不平衡磁拉力、机械不平衡力和重力共同作用下的某型动车牵引电机转子系统动力学方程, 并采用 Runge-Kutta 算法求解系统动力学响应, 最后重点讨论了初始静偏心和重力载荷对牵引电机转子轴心轨迹和位移频谱的影响规律。结果表明: ① 重力载荷对电机转子系统的影响等价于在重力方向上施加一个恒定静偏心量, 其与初始静偏心的矢量叠加组成气隙的综合静偏心量; ② 综合静偏心量的大小和方向影响转子轴心轨迹的位置和方向, 偏心量越大转子轴心轨迹的偏移距离也越大且偏移方向沿静偏心方向; ③ 静偏心量的增大使该型牵引电机转子轴心轨迹略微增大, 可以认为基本不变, 同时, 静偏心量增大也使转子位移频谱成分更加显著和多样化。

关键词: 牵引电机; 初始静偏心; 重力载荷; 不平衡磁拉力

中图分类号: U266; TH113

Initial Static Eccentricity and Gravity Load on Rotor Orbit of EMU Traction Motor

ZHOU Shengtong¹ ZHU Jingwei^{1,2} XIAO Qian¹ GUO Weinian¹ ZHOU Xinjian¹

(1. School of Mechatronics & Vehicle Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013;

2. Zhuzhou Railway Station, China Railway Guangzhou Group Co., Ltd., Zhuzhou 412000)

Abstract: Aiming at the rotor vibration characteristics of the traction motor in electric multiple units (EMU) with initial static eccentricity under gravity load, a unified analytical expression of unbalanced magnetic pull (UMP) of motor under no-load or load operations with static and dynamic air-gap eccentricity fault and arbitrary pole pairs is first given by using magnetic potential multiplying permeability method and Maxwell stress tensor method. Then, Jeffcott model is used to establish the dynamic equation of traction motor rotor system under action of UMP, mechanical unbalance force and gravity, and the Runge-Kutta algorithm is used to solve the dynamic response of the system. Finally, the influence of initial static eccentricity and gravity load on the orbits and displacement spectrum of the traction motor rotor is discussed. Results show that: ① the effect of gravity load on the motor rotor system is equivalent to applying a constant static eccentricity in the direction of gravity, which superposes the initial static eccentricity vector to form a resultant static eccentricity in the air-gap; ② the magnitude and direction of the resultant static eccentricity affect the position and direction of the rotor orbit. The larger the eccentricity is, the larger the offset distance of the rotor orbit is and the offset direction is along the static eccentric direction; ③ The increase of static eccentricity makes the rotor orbits of this traction motor slightly increase, which can be considered as basically unchanged. At the same time, the increase of static eccentricity also makes the rotor displacement spectrum components more significant and diversified.

Key words: traction motor; initial static eccentricity; gravity load; unbalanced magnetic pull

* 国家自然科学基金(51505146, 51765018)、江西省自然科学基金(20161BAB216135, 20181ACB20007)和西南交通大学牵引动力国家重点实验室开放课题(TPL1806)资助项目。20190712 收到初稿, 20200324 收到修改稿

0 前言

三相异步牵引电机因具有结构简单、牢固,工作可靠,制造成本低廉,单位功率重量小等优点,在高速动车组列车驱动中被普遍采用^[1]。但作为一种典型的机电耦合系统,动车牵引电机振动情况复杂,特别是当定转子间存在气隙偏心时,电机内部将产生不平衡磁拉力^[2]。不平衡磁拉力(Unbalanced magnetic pull, UMP)具有负刚度特性且能激发出更为复杂的振动噪声,严重时还可能发生定转子碰磨故障,因此研究UMP对转子系统振动的影响无论对动车牵引电机器的设计制造还是运行维护都是十分重要的。

不平衡磁拉力主要是由电机各零部件(定子、转子、轴承等)的加工精度、安装误差以及零部件的振动和变形等原因造成的定转子间气隙分布不均匀引起的^[3-4]。在不平衡磁拉力的理论研究方面,早在20世纪初SMITH^[5]等就对气隙偏心及其引起的不平衡磁拉力作了初步研究,此后,国内外学者在不平衡磁拉力的线性/非线性解析模型和有限元模型方面做了深入研究^[4,6-8]。在解析模型方面,传统的线性表达在工程实践中通常误差较大,因而一些较为精确的非线性解析表达被陆续提出,其中GUO等^[9-10]推导了气隙偏心下任意磁极对下三相同步电机空载时的不平衡磁拉力解析式并被广泛应用^[11-12]。在静动复合偏心时,万书亭等^[13]、唐贵基等^[14]给出了极对数为1的汽轮发电机负载运行时的不平衡磁拉力公式,岳二团等^[2]给出了永磁同步电机负载运行时的不平衡磁拉力解析式。但这些公式多是在特定工况下的不平衡磁拉力表达式,仍缺乏同时适用于任意极对数、静动偏心以及空载/负载运行下的统一解析表达式。另一方面,在电机转子动力学模型中考虑不平衡磁拉力已逐渐成为学者们的共识^[12]。岳二团等^[2]建立了包含不平衡磁拉力作用的永磁同步电机的弯扭耦合振动方程,讨论了不同偏心和负载类型对转子系统振动特性的影响。徐学平等^[15]采用不平衡磁拉力的积分表达建立了三相同步发电机的动力学方程,讨论了静载荷作用下偏心转子系统的电磁振动特性。柏洁明^[16]建立了同步电机的四自由度转子模型,分析了不平衡磁拉力和机械不平衡力作用下的解析周期解和稳定性。ZHANG等^[17]考虑气隙偏心、质量偏心和滚动轴承非线性建立了永磁同步电机的四自由度转子动力学模型,分析了不同静偏心大小、圆盘位置以及轴承径向间隙下的动力学特性。不过,当前在高速列车中考虑不平衡磁拉力的牵引电机转子动力学研究尚不多见,而多是从机

械力或电磁场角度来分析动车牵引电机^[18-20]。

为此,以某型高速动车组用牵引电机转子系统为分析对象,首先在前人工作基础上给出一种可适用于静动气隙偏心、空载/负载运行和任意磁极对数的电机不平衡磁拉力统一解析表达式,之后考虑静动气隙偏心建立不平衡磁拉力、机械不平衡力和重力共同作用下的动车牵引电机转子模型,最后详细探讨初始静偏心参数(大小和方向)、重力及其同时作用下的牵引电机转子轴心轨迹变化规律。

1 电机的不平衡磁拉力解析式

图1示意了电机定转子间的静动气隙偏心故障。其中外圆为定子内表面, O 为定子中心,内圆为转子外表面, O'_1 为转子中心, O_1 为转子的初始静偏心位置。显然,转子无外力作用且静止时 O'_1 与 O_1 重合。取 r_0 为初始静偏心距离, γ_0 为初始静偏心方向角,并建立坐标系 XO_1Y ,那么转子瞬时中心 $O'_1(x, y)$ 相对定子中心 O 的偏移量 r 可表示为

$$r(t) = \overline{OO'_1} = \sqrt{(r_0 \cos \gamma_0 + x)^2 + (r_0 \sin \gamma_0 + y)^2} \quad (1)$$

式中 x, y ——转子中心的瞬时径向位移。

图1 电机静动气隙偏心故障

转子中心偏移方位角 γ 表示为

$$\tan \gamma(t) = \frac{r_0 \sin \gamma_0 + y}{r_0 \cos \gamma_0 + x} \quad (2)$$

不考虑齿槽的影响,那么静动偏心下任意空间位置角 θ 处的气隙长度可以近似表达为^[2]

$$\delta(\theta, t) \approx \delta_0 - r(t) \cos[\theta - \gamma(t)] \quad (3)$$

式中 δ_0 ——均匀气隙长度。

另一方面,根据三相异步牵引电机负载运行相量图,且不考虑谐波磁势影响,那么定转子气隙基波合成磁势为^[3]

$$F(\theta, t) = F_1 \cos(\omega t - p\theta) + F_2 \cos(\omega t - p\theta - \phi_0) = F_0 \cos(\omega t - p\theta - \phi) \quad (4)$$

式中 F_1 ——定子绕组三相基波合成磁势幅值;
 F_2 ——转子绕组基波合成磁势幅值;
 F_0 ——定转子基波合成磁势幅值;
 $F_0 = \sqrt{F_1^2 + F_2^2 + 2F_1F_2 \cos \phi_0}$;
 ϕ_0 ——定子超前转子的磁势夹角;
 ϕ ——定转子合成磁势初始相位角;
 $\phi = \arctan[F_2 \sin \phi_0 / (F_1 + F_2 \cos \phi_0)]$;
 p ——电机磁极对数;
 ω ——供电角频率;
 $\omega = 2\pi f_e$;

f_e ——供电频率。

设 μ_0 为空气磁导率, 那么在式(3)和(4)基础上, 基于磁势乘磁导法可得近似的气隙磁密分布

$$B(\theta, t) = F(\theta, t) \cdot \frac{\mu_0}{\delta(\theta, t)} = \mu_0 \frac{F_0 \cos(\omega t - p\theta - \phi)}{\delta_0 - r(t) \cos[\theta - \gamma(t)]} \quad (5)$$

进一步, 按照文献[9-10]中推导思路, 对气隙磁导进行级数展开, 并忽略切向气隙磁密分量, 假设铁芯磁导无穷大, 可推导出电机负载运行下不同磁极对数时的不平衡磁拉力表达式

$$F_{\text{magx}} = \begin{cases} f_1 \cos \gamma + f_{2c} \cos(2\omega t - \gamma) + f_{2s} \sin(2\omega t - \gamma) + f_{3c} \cos(2\omega t - 3\gamma) + f_{3s} \sin(2\omega t - 3\gamma) & (p=1) \\ f_1 \cos \gamma + f_{3c} \cos(2\omega t - 3\gamma) + f_{3s} \sin(2\omega t - 3\gamma) + f_{4c} \cos(2\omega t - 5\gamma) + f_{4s} \sin(2\omega t - 5\gamma) & (p=2) \\ f_1 \cos \gamma + f_{4c} \cos(2\omega t - 5\gamma) + f_{4s} \sin(2\omega t - 5\gamma) & (p=3) \\ f_1 \cos \gamma & (p \geq 4) \end{cases} \quad (6)$$

$$F_{\text{magy}} = \begin{cases} f_1 \sin \gamma + f_{2c} \sin(2\omega t - \gamma) - f_{2s} \cos(2\omega t - \gamma) - f_{3c} \sin(2\omega t - 3\gamma) + f_{3s} \cos(2\omega t - 3\gamma) & (p=1) \\ f_1 \sin \gamma + f_{3c} \sin(2\omega t - 3\gamma) - f_{3s} \cos(2\omega t - 3\gamma) - f_{4c} \sin(2\omega t - 5\gamma) + f_{4s} \cos(2\omega t - 5\gamma) & (p=2) \\ f_1 \sin \gamma + f_{4c} \sin(2\omega t - 5\gamma) - f_{4s} \cos(2\omega t - 5\gamma) & (p=3) \\ f_1 \sin \gamma & (p \geq 4) \end{cases} \quad (7)$$

其中

$$\begin{aligned} f_1 &= \frac{RL\pi}{4\mu_0} (2A_0A_1 + A_1A_2 + A_2A_3)(F_1^2 + F_2^2 + 2F_1F_2 \cos \phi_0) \\ f_{2c} &= \frac{RL\pi}{4\mu_0} \left(A_0A_1 + \frac{1}{2}A_1A_2 + \frac{1}{2}A_2A_3 \right) (F_1^2 + 2F_1F_2 \cos \phi_0 + F_2^2 \cos 2\phi_0) \\ f_{2s} &= \frac{RL\pi}{4\mu_0} \left(A_0A_1 + \frac{1}{2}A_1A_2 + \frac{1}{2}A_2A_3 \right) (2F_1F_2 \sin \phi_0 + F_2^2 \sin 2\phi_0) \\ f_{3c} &= \frac{RL\pi}{4\mu_0} \left(A_0A_3 + \frac{1}{2}A_1A_2 \right) (F_1^2 + 2F_1F_2 \cos \phi_0 + F_2^2 \cos 2\phi_0) \\ f_{3s} &= \frac{RL\pi}{4\mu_0} \left(A_0A_3 + \frac{1}{2}A_1A_2 \right) (2F_1F_2 \sin \phi_0 + F_2^2 \sin 2\phi_0) \\ f_{4c} &= \frac{RL\pi}{8\mu_0} A_2A_3 (F_1^2 + 2F_1F_2 \cos \phi_0 + F_2^2 \cos 2\phi_0) \\ f_{4s} &= \frac{RL\pi}{8\mu_0} A_2A_3 (2F_1F_2 \sin \phi_0 + F_2^2 \sin 2\phi_0) \end{aligned} \quad (8)$$

式中 R ——转子半径;
 L ——气隙的轴向长度;
 A_n ——气隙磁导的 Fourier 展开系数^[7]。

$$A_n = \begin{cases} \frac{\mu_0}{\delta_0} \frac{1}{\sqrt{1-\varepsilon^2}} & (n=0) \\ \frac{2\mu_0}{\delta_0} \frac{1}{\sqrt{1-\varepsilon^2}} \left(\frac{1-\sqrt{1-\varepsilon^2}}{\varepsilon} \right)^n & (n>0) \end{cases} \quad (9)$$

式中 ε ——相对偏心量;

$$\varepsilon = r / \delta_0。$$

当仅考虑电机空载运行工况, 式(6)~(9)可退化为郭丹等^[9-10]给出的三相同步发电机的不平衡磁拉力公式; 若极对数 $p=3$ 且电机负载运行, 则与岳二团等^[12]给出的永磁同步电机的不平衡磁拉力公式一致; 当极对数较多 ($p>3$) 且只考虑气隙磁导前两项, 并忽略 ε 高阶项 (高于 3 次方的项) 时, 则与徐友进等^[21]给出的公式保持一致。可见, 上述式(6)~(9)表达的电机不平衡磁拉力解析式可应用于具有静动气隙偏心、任意磁极对数以及空载或负载运行的情况, 相比已有公式, 适用范围更广, 这里将它们称为电机不平衡磁拉力的统一解析表达式。

2 动车牵引电机转子动力学方程

作为高速动车组列车牵引驱动的核心能量转换单元,牵引电机转子系统中作用有气隙偏心引起的不平衡磁拉力、质量偏心引起的机械不平衡力以及重力等多种载荷。这里以某型动车组牵引电机为分析对象,考虑不平衡磁拉力、机械不平衡力以及重力作用,建立牵引电机转子系统的 Jeffcott 模型(图 2),其动力学微分方程为:

图2 牵引电机转子径向振动模型

$$\begin{cases} m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = F_{magx} + 4\pi^2 ma\Omega^2 \cos(2\pi\Omega t) \\ m\ddot{y} + c\dot{y} + ky = F_{mgy} + 4\pi^2 ma\Omega^2 \sin(2\pi\Omega t) + mg \end{cases} \quad (10)$$

式中右端第一项为不平衡磁拉力分量,其分量由式(6)~(9)定义;右端第二项为机械不平衡力分量(记为 F_{mx} 和 F_{my});第二式右端第三项为转子重力。本例中设质量偏心距 $a = 0.1 \text{ mm}$, Ω 为电机转速,该型牵引电机的额定转速为 $\Omega = 69 \text{ Hz}$,转子质量 $m = 200 \text{ kg}$,径向刚度 $k = 1.48 \times 10^8 \text{ N/m}$,系统阻尼参照文献[19]中取值 $c = 300 \text{ N} \cdot \text{s/m}$ 。此外,该型牵引电机是 4 极鼠笼式三相异步牵引电动机,其相应的电机参数为 $R = 0.153 \text{ m}$, $L = 0.295 \text{ m}$, $\delta_0 = 2 \times 10^{-3} \text{ m}$, $\mu_0 = 4 \pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$, $F_1 = 6523 \text{ A}$, $F_2 = 5571 \text{ A}$, $\varphi_0 = 2.90 \text{ rad}$, $f_e = 140 \text{ Hz}$, $p = 2$ 。

针对非线性方程式(10),取初值为零,利用四阶定步长 Runge-Kutta 算法求解初始静偏心和重力载荷单独和共同作用下的牵引电机转子轴心轨迹和振动响应。

3 牵引电机转子轴心轨迹特性分析

3.1 初始静偏心的影响

设不考虑重力影响,此时该电机转子系统模型可以认为是轴对称的,初始静偏心方向的选取并不影响该工况下的系统振动特性规律。为此,这里人为取初始静偏心方向为 x 轴正向,转频为 $\Omega = 69 \text{ Hz}$,分析不同初始静偏心量对牵引电机转子轴心轨迹和位移频谱的影响。

图 3 给出了 $r_0 = 0, 0.05, 0.1 \text{ (mm)}$ 时的转子轴

图3 不同初始静偏心量下的转子轴心轨迹

心轨迹情况。其中,点“o”代表定子中心 O ,点“*”代表初始静偏心位置 O_1 ,亦是坐标原点。可以看到,当初静偏心量为零时(图 3a),转子处于动偏心状态,此时轴心轨迹呈现圆形,且轨迹中心与 O_1 以及 O 重合。当初静偏心不为零时,转子处于静动复合偏心状态,此时轴心轨迹呈现接近圆形的椭圆状。通过分析轴心轨迹数据可以发现,椭圆状轨迹长轴沿初始静偏心方向(即 x 轴正向)且轨迹中心往初始静偏心方向偏移,如图 3b、3c 和 3d 所示。其中图 3d 是将轴心轨迹变换至以定子中心为原点的坐标系 $OX'Y'$ 下的情况,可以看到随着初始静偏心量 r_0 的增大,轨迹中心偏离静偏心位置的距离 s 也逐渐增大,从 $r_0 \in [0, 0.2] \text{ mm}$ 范围内的偏移数据来看该型牵引电机转子的 r_0 与 s 间近似呈线性关系。图 4 示意了初始静偏心量影响下的轴心轨迹位置和形状关系。在轨迹大小方面,轴心轨迹随静偏心量的增加呈增大趋势,但增大幅度很小,可以认为基本不变。

从图 5 中时域波形可以看出,不平衡磁拉力分量 F_{magx} 的均值随初始静偏心量增大而增大(如图 5a 和 5b 所示),而分量 F_{mgy} 的均值则等于零(如图 5c

图4 初始静偏心量影响下轴心轨迹位置和形状示意

图5 不同初始静偏心量下不平衡磁拉力时域波形

和 5d 所示), 即 F_{magy} 的均值不受静偏心量影响, 这是由于初始静偏心方向取为 x 轴正向的缘故。在振动幅值上, 相同初始静偏心量下, F_{magx} 的幅值要比 F_{magy} 的略大, 这与转子轴心轨迹呈现椭圆状的现象是相符的, 这是因为由质量偏心引起的机械不平衡力 F_{mx} 和 F_{my} 的幅值是一致的, 那么在这两类不平衡力的叠加作用下转子涡动幅值在 x 方向也会略大于 y 向, 从而使得轴心轨迹呈现接近圆形的椭圆状。另外, 对时程数据分析发现, 随着静偏心量的增大, 不平衡磁拉力的波动幅值虽有增加, 但非常小, 可以认为基本不变。这一现象与图 3 中观察到的轴心轨迹大小基本不变的现象相符。

图 6 为不同静偏心率(r_0/δ_0)下转子轴心位移频谱三维瀑布图。可以看到位移频谱中较为明显地包含零频分量(0 Hz)、固有频率分量($\omega_n = 119$ Hz)、转频分量($\Omega = 69$ Hz)、二倍转频分量($2\Omega = 138$ Hz)、二倍供电频率($2f_e = 280$ Hz)及其与转频的组合分量($2f_e - 2\Omega = 142$ Hz, $2f_e - \Omega = 211$ Hz)等, 但二倍供电频率及其与转频的组合在偏心率较小时表现并不明显或未出现, 这也说明增大静偏心量会使偏心对系统振动特性的影响增强, 使得位移频谱中频率成分更加多样化, 这与文献[15]中规律一致。另外, 在各频率成分中, 除零频分量(其幅值对应于偏移距离 s)外, 转频分量的幅值最大, 比其他频率分量高出 2 个数量级以上, 这说明转子振动响应主要由转频分量决定。随着静偏心量增大, 各分量幅值均呈增加趋势, 但转频分量的幅值虽有增加, 但相比自身幅值变化很小, 可以认为基本不变。这与图 3 中观察到的轴心轨迹大小基本不变的现象相符。

图6 不同静偏心率时转子的位移频谱

3.2 重力载荷的影响

不考虑初始静偏心, 即令 $r_0 = 0$, 此时系统处于动偏心状态, 并设作用有重力载荷, 方向恒沿 y 轴负向, 分析重力载荷下转子轴心轨迹和位移频谱, 同时考虑转子转速的影响。

图7为不同转速下动偏心转子的轴心轨迹。可以看到,转速并不影响轴心轨迹的位置,仅影响轨迹大小,即不同转速下的轴心轨迹为“同心”状态。当考虑重力载荷时,转子轴心轨迹会整体沿重力方向(y轴负向)偏移。与图3中初始静偏心下的轴心轨迹对比,可以发现重力载荷的作用相当于在重力方向上施加一个恒定静偏心量。从力学上讲,该静偏心量等于重力引起的静位移,即 $r_{0g} = mg/k = 0.0132 \text{ mm}$ 。从图7b来看,与轴心轨迹的大小相比,重力引起的轨迹位置偏移作用不可忽略。

图7 不同转速下重力对动偏心转子轴心轨迹的影响

图8为不同转速下动偏心转子位移频谱三维瀑布图。可以看到不考虑重力时位移频谱中仅包含转频分量(Ω)和固有频率分量(ω_n),这两个分量的幅值

图8 不同转速下动偏心转子的位移频谱

均随转速增加而增加;当考虑重力时,除了转频、固有频率分量之外,还包括二倍供电频率分量($2f_c$)和二倍供电频率减一倍和二倍转频分量($2f_c - \Omega$, $2f_c - 2\Omega$),但在转速较高时它们就被淹没了,这是因为转速越高机械不平衡力贡献就越大,而由重力引起的静偏心产生的不平衡磁力贡献就变得非常少,相应的频率分量就会被淹没而消失。当转速 Ω 升高到 30 Hz 以后,出现了二倍转频分量(2Ω),当其与固有频率分量(ω_n)重合时,频谱中出现了较大的峰值,即“共振点”。另外,转频和固有频率分量在不考虑重力与考虑重力情况下的幅值无明显的差别,说明重力对轴心轨迹大小的影响很小,这与前述静偏心量对轴心轨迹大小的影响规律相符。图8a和8b中的频率分量也表明重力载荷(或静偏心)的存在使得位移频谱成分变得更加多样化。

3.3 初始静偏心与重力的共同影响

3.3.1 初始静偏心方向为零时工况

取初始静偏心方向沿 x 轴正向,即 $\gamma_0 = 0^\circ$,重力恒沿 y 轴负向,分析初始静偏心与重力共同作用时电机转子的轴心轨迹和位移频谱,并考虑转速的影响。

图9给出了该工况时不同转速下的轴心轨迹情况。观察和对比图3c、图7b和图9a中轴心轨迹,可以发现初始静偏心与重力共同作用下的轴心轨迹位置可以看作是两者单独作用时的合成。而在轴心轨迹大小方面,无论是两者共同作用还是单独作用,转频为 69 Hz 时的轨迹大小并没有明显改变。这与前述初始静偏心和重力对轴心轨迹大小的影响相一致。有关两者共同作用时的轴心轨迹位置规律的详细讨论将在下一节给出,这里先略过。在轨迹形状方面,转速在 30 、 50 和 69 (Hz) 时,仍然整体表现为接近圆形的椭圆状,但当转速降到 10 Hz 时,如图9b所示,其表现出了与文献[9,15]中类似的花瓣状轨迹,说明在该型牵引电机中较低的转速使得质量偏心引起的转频分量贡献变小,突出了气隙偏心引起的非转频分量的贡献,从而在轴心轨迹上显现了更高频的轨迹波动。

图9 不同转速下初始静偏心与重力作用下的轴心轨迹

另外,从图 9a 中还可以看到转速的增加会增大轴心轨迹大小,但不改变轴心轨迹的位置。

图 10 是不同转速下转子位移频谱三维瀑布图。可以看到初始静偏心和重力共同作用下的位移频谱与图 8b 中仅考虑重力作用的位移频谱非常类似,但包含初始静偏心的共同作用使得位移频谱中的分量更加明显。这一方面验证了初始静偏心与重力载荷产生的静位移在电机气隙偏心故障的贡献上属于同一类,另一方面由于该工况下初始静偏心量(即 $r_0=0.1\text{ mm}$)远大于重力引起的静位移(即 $r_{0g}=mg/k=0.0132\text{ mm}$),从而使得含初始静偏心作用下的位移频谱更加明显。另外,随着转速的增加,除了零频分量和二倍供电频率分量外,其他频率分量均呈增加趋势,其中二倍转频分量(2Ω)与固有频率分量(ω_n)的交点处还产生了共振点。零频分量的振幅保持不变,这与造成该零频分量的初始静偏心和重力载荷保持不变相一致。二倍供电频率分量($2f_e$)的幅值则略有下降,但基本可以认为不变。

图 10 不同转速下初始静偏心与重力作用下的位移频谱

3.3.2 初始静偏心方向的影响

工程中初始静偏心方向通常是任意的。虽然本算例中牵引电机转子模型是轴对称的,但当同时作用初始静偏心和重力载荷时,两者夹角的改变就可能引起系统响应的不同。为此,取转子静偏心率 $r_0/\delta_0=5\%$,即初始静偏心 $r_0=0.1\text{ mm}$,重力载荷恒沿 y 轴负向,转频 $\Omega=69\text{ Hz}$,分析不同偏心方向角条件下的转子轴心轨迹及位移频谱。

图 11 给出了初始静偏心角 $\gamma_0=90^\circ$ 、 270° 、 45° 、 315° 和 0° 时的轴心轨迹,其中图 11f 是将轴心轨迹变换至以定子中心为原点的坐标系 $OX'Y'$ 的情况。可以看到不同方向角下转子轴心轨迹都呈现接近圆形的椭圆状,但椭圆长轴方向不再沿初始静偏心方向,而是由初始静偏心矢量和重力引起的静位移矢量叠加而成的综合静偏心量决定,如图 12 所示。

由轴心轨迹数据分析发现,当两者矢量和的大小大于初始静偏心量时,如 $\gamma_0=270^\circ$ 、 315° 和 0° ,重力会加剧转子径向振动;当两者矢量和的大小小于初始静偏心量时,如 $\gamma_0=45^\circ$ 和 90° ,重力会减轻转子径向振动,但这种加剧和减轻效果相比质量偏心引起的振动幅值非常小,因而对于本算例来说轴心轨迹大小可以认为基本不受初始静偏心角影响。

(f) $OX'Y'$ 坐标系下的轴心轨迹

图 11 不同初始静偏心角下的转子的轴心轨迹

图12 初始静偏心角影响下轴心轨迹位置规律示意

图13为不同初始静偏心方向下转子轴心位移频谱三维瀑布图。可以看到位移频谱中明显包含零频分量(0 Hz)、固有频率分量(ω_n)、转频分量(Ω)、二倍转频分量(2Ω)、二倍供电频率($2f_e$)及其与转频的组合分量($2f_e-2\Omega$, $2f_e-\Omega$)。其中, 零频分量和转频分量的幅值最大, 超出其他频率分量2个数量级以上。

图13 不同初始静偏心角时转子的x向位移频谱

此外, 随着初始静偏心方向角的变化, 各频率分量的幅值也发生改变。从图13中的x向位移频谱可以看到: 零频分量幅值在 0° 和 180° 时最大, 在 90° 和 270° 时最小, 这是因为该零频分量主要是由综合静偏心的x向分量引起, 而初始静偏心量在 90° 和 270° 时的x向投影为零, 在 0° 和 180° 时投影最大, 因而使得零频分量幅值随初始静偏心角的变化呈现上述规律。同样, 转频分量幅值虽然整体波动幅值很小, 但也表现出了同零频分量类似的波动规律, 如图14a所示。这是因为转频分量幅值是由综合静偏心和质量偏心共同决定的, 其中质量偏心引起的x向转频分量振幅与初始静偏心角无关, 但综合静偏心引起的x向转频分量振幅则随初始静偏心角呈现类似余弦变化, 两者叠加之后就呈现前述波动规律。其他分量的幅值(如 $2f_e$ 、 $2f_e-\Omega$ 、 $2f_e-2\Omega$ 、 2Ω)随初始静偏心角变化也存在小幅波动, 表现为先减小, 然后增大, 再减小的变化趋势, 其中在 90° 附近达到最小幅值, 在 270° 附近达到最大幅值, 类似图14b所示。这是因为这几个分量的幅值波动主要

由综合静偏心量大小决定, 由图12中示意可知, 在包含重力载荷的静偏心位置圆上, 当 90° 时综合静偏心量最小, 而 270° 时最大, 因而表现出上述波动规律。对于固有频率分量, 其幅值则随初始静偏心角的波动较为复杂, 如图14c所示。

图14 不同初始静偏心角下各频率分量的幅值

4 结论

本文给出了适用范围更广的电机不平衡磁拉力统一解析表达式(静动气隙偏心、任意磁极对数、空/负载运行), 并在此基础上针对高速动车组用某型牵引电机, 研究计及不平衡磁拉力的电机转子振动特性, 并详细讨论了初始静偏心、重力载荷单独作用和同时作用下的转子轴心轨迹和位移频谱的变化规律。主要结论如下。

(1) 无论初始静偏心和重力的单独作用还是共同作用, 该牵引电机转子轴心轨迹形状均呈现接近圆形的椭圆状, 且轨迹中心位置沿椭圆长轴方向偏移, 而长轴方向由初始静偏心矢量和重力引起的静位移矢量之和(综合静偏心量)决定, 即重力引起的静位移在效果上等同于在电机转子系统中施加了一

个同方向同大小的恒定静偏心量。

(2) 增大静偏心量会使牵引电机转子轴心轨迹的大小增加, 因而无论初始静偏心和重力载荷是单独还是同时作用, 只要使得综合静偏心量增加均会增大轴心轨迹, 但在该型牵引电机中这种增大很小, 可以认为基本不变。此外, 各工况下转子转速增加会增大轴心轨迹的大小, 但对轴心轨迹位置不影响。

(3) 在初始静偏心和重力作用下该牵引电机转子位移频谱中明显包含零频(0)、固有频率(ω_n)、转频(Ω)、二倍转频(2Ω)、二倍供电频率($2f_e$)及其与一倍和二倍转频的组合($2f_e - 2\Omega$, $2f_e - \Omega$)等分量, 而且综合静偏心量越大频谱中各频率成分也越明显。各频率分量中, 除零频分量外, 以转频分量(Ω)幅值最大, 常超出其他频率分量两个数量级以上, 是振动响应的最大贡献者, 使得其他频率分量的贡献非常有限。另外, 随着转速的增加, 当二倍转频与固有频率相交时会出现共振点。

参 考 文 献

- [1] 沈本荫. 牵引电机[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2010. SHEN Benyin. Traction motor[M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2010.
- [2] 岳二团, 甘春标, 杨世锡. 气隙偏心下永磁电机转子系统的振动特性分析[J]. 振动与冲击, 2014, 33(8): 29-34. YUE Ertuan, GAN Chunbiao, YANG Shixi. Vibration characteristics analysis of a rotor for a permanent magnet motor with air-gap eccentricity[J]. Journal of Vibration and Shock, 2014, 33(8): 29-34.
- [3] 邱家俊. 机电分析动力学[M]. 北京: 科学出版社, 1992. QIU Jiajun. Electromechanical analytical dynamics[M]. Beijing: Science Press, 1992.
- [4] 鲍晓华, 吕强. 感应电机气隙偏心故障研究综述及展望[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(6): 93-100. BAO Xiaohua, LÜ Qiang. Review and prospect of air-gap eccentricity faults in induction machines[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(6): 93-100.
- [5] SMITH C F. The irregularities in the rotating field of the polyphase induction motor[J]. Journal of the Institution of Electrical Engineers, 1911, 46(205): 132-159.
- [6] DORRELL D G. Sources and characteristics of unbalanced magnetic pull in three-phase cage induction motors with axial-varying rotor eccentricity[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2011, 47(1): 12-24.
- [7] TENHUNEN A. Electromagnetic forces acting between the stator and eccentric cage rotor[D]. Espoo: Helsinki University of Technology, 2003.
- [8] 狄冲, 鲍晓华, 王汉丰, 等. 感应电机混合偏心情况下径向电磁激振力的研究[J]. 电工技术学报, 2014, 29(S1): 138-144. DI Chong, BAO Xiaohua, WANG Hanfeng, et al. Study on radical electromagnetic excitation forces of induction motor under mixed eccentricity[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(S1): 138-144.
- [9] GUO D, CHU F, CHEN D. The unbalanced magnetic pull and its effects on vibration in a three-phase generator with eccentric rotor[J]. Journal of Sound and Vibration, 2002, 254(2): 297-312.
- [10] 郭丹, 何永勇, 褚福磊. 不平衡磁拉力及对偏心转子系统振动的影响[J]. 工程力学, 2003(2): 116-121. GUO Dan, HE Yongyong, CHU Fulei. The calculation of unbalanced magnetic pull and its effect on vibration of an eccentric rotor[J]. Engineering Mechanics, 2003, 20(2): 116-121.
- [11] WU B, SUN W, LI Z, et al. Circular whirling and stability due to unbalanced magnetic pull and eccentric force[J]. Journal of Sound and Vibration, 2011, 330(21): 4949-4954.
- [12] XU X, HAN Q, CHU F. Review of electromagnetic vibration in electrical machines[J]. Energies, 2018, 11(7): 1-33.
- [13] 万书亭, 李和明, 李永刚. 气隙偏心对汽轮发电机定转子振动特性的影响[J]. 振动与冲击, 2005, 24(6): 21-23. WAN Shuting, LI Heming, LI Yonggang. Analysis on vibration characteristics of generator with the fault of eccentric air-gap[J]. Journal of Vibration and Shock, 2005, 24(6): 21-23.
- [14] 唐贵基, 邓玮琪, 何玉灵. 不同种类气隙偏心故障对汽轮发电机转子不平衡磁拉力的影响[J]. 振动与冲击, 2017, 36(15): 1-8. TANG Guiji, DENG Weiqi, HE Yuling. Effect of different kinds of air-gap eccentricity faults on rotor UMP of a turbo-generator[J]. Journal of Vibration And Shock, 2017, 36(15): 1-8.
- [15] 徐学平, 韩勤锴, 褚福磊. 静载荷作用下偏心转子电磁振动特性[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2016, 56(2): 176-184. XU Xueping, HAN Qinkai, CHU Fulei. Electromagnetic vibration characteristics of an eccentric rotor with a static load[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2016, 56(2): 176-184.
- [16] 柏洁明. 不平衡磁拉力作用下偏心转子周期解及稳定性研究[D]. 长春: 吉林大学, 2016.

- BAI Jieming. Study on periodic solutions and their stabilities of eccentric rotors under unbalanced magnetic excitation[D]. Changchun: Jilin University, 2016.
- [17] ZHANG A, BAI Y, YANG B, et al. Analysis of nonlinear vibration in permanent magnet synchronous motors under unbalanced magnetic pull[J]. Applied Sciences, 2018, 8(1): 113.
- [18] 陈聚龙, 王俊国, 陈跃威, 等. 铁路机车牵引电机临界转速和不平衡响应分析[J]. 机械强度, 2017, 39(6): 1264-1270.
- CHEN Julong, WANG Junguo, CHEN Yuewei, et al. Critical speed and unbalance response of traction motor for railway locomotive[J]. Journal of Mechanical Strength, 2017, 39(6): 1264-1270.
- [19] 陈哲明, 曾京. 牵引电机转子振动对高速列车动力学性能的影响[J]. 工程力学, 2011, 28(1): 238-244.
- CHEN Zheming, CENG Jing. Effect of rotor vibration of traction motor on dynamic behavior of high speed train[J]. Engineering Mechanics, 2011, 28(1): 238-244.
- [20] 吴顺海. 高速动车组用异步牵引电机内电磁场的时步有限元计算与分析[J]. 电力机车与城轨车辆, 2011, 34(1): 1-4.
- WU Shunhai. Time-stepping finite element calculation and analysis of electromagnetic in asynchronous traction motor for high-speed EMU[J]. Electric Locomotives & Mass Transit Vehicles, 2011, 34(1): 1-4.
- [21] 徐进友, 刘建平, 宋轶民, 等. 水轮发电机转子非线性电磁振动的幅频特性[J]. 中国机械工程, 2010, 21(3): 348-351.
- XU Jinyou, LIU Jianping, SONG Yimin, et al. Amplitude-frequency characteristics of nonlinear electromagnetic vibration in a hydro-generator rotor[J]. China Mechanical Engineering, 2010, 21(3): 348-351.
-
- 作者简介:** 周生通, 男, 1984 年出生, 博士, 讲师, 硕士研究生导师。主要研究方向为轨道车辆牵引驱动系统动力学、转子动力学和工程可靠性。
E-mail: zhoushengtong@foxmail.com
- 肖乾(通信作者), 男, 1977 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为轨道车辆轮轨关系、轨道车辆运行品质分析与评价、轨道车辆运维装备研究与开发。
E-mail: jxralph@foxmail.com