

电机驱动机械系统动力学的研究*

干 东 英

提 要

本文討論了三相异步电动机电磁慣性对它們过渡过程影响的一些实验研究方法。詳細地敘述了实验过程和实验所用的装置。在分析了实验所得到的全部数据后文章指出,当电动机在机械特性曲线稳定区域工作即在額定角速度附近工作时,电磁常数很小,因此在动力学计算中可忽略不計。

此外,本文还列举了在外界簡諧激励下有关机械系统动力学的实验研究。这时所获得的结果指出,电动机軸角速度的变动仅取决于由外界激励力所引起的振动。电磁慣性对这些振动的影响非常之小,以致实际上可以忽略不計。

在著作 [1] 中指出了,直流电机的电磁慣性如何影响到电机的过渡过程。苏联科学院机械研究所机械动力学研究室經过实验^[2]証实了著作 [1] 中所推导出的理論研究的结果。

由于在工业中最广泛使用的是三相异步交流电动机,因此闡明其电磁慣性起什么影响,是一个令人感兴趣的問题。在文献中指出,异步电机电磁慣性是可以忽略不計的,但是要用理論研究来証明这一見解是很困难的。因此,本文提出以实验来研究这一問题的方法。

一、用空載起动机求异步电机的电磁常数

包括所有力和质量的电机轉子运动方程可写成^[1]

$$\lambda J \ddot{\omega} + J \dot{\omega} = M_{\pi} - M_c - \lambda M'_c, \quad (1)$$

式中

$\lambda = \frac{L}{r}$ ——电动机轉子的电感与电阻的比值,即电机电磁常数;

J ——机組机构各构件轉化到轉子軸上的等效慣性力矩;

M_{π} ——电动机发出的驅动力矩;

M_c ——轉化到电动机轉子軸上的阻力矩;

ω ——电动机轉子角速度。

在研究电机空載起动机时,上式可写成

$$\lambda J \ddot{\omega} + J \dot{\omega} = M_{\pi}, \quad (2)$$

或

* 1961 年 9 月 4 日收到。

$$\lambda = \frac{M_{\pi} - J\dot{\omega}}{J\dot{\omega}}, \quad (3)$$

方程(3)可用来确定电机空载起动过渡过程中任何时刻之电磁常数。为此目的,必需预先确定方程(3)右边部分之各值。

M_{π} 值可从电机静态特性曲线中求得,而电机静态特性 $M_0(\omega^*)$ 可通过实验再由方程

$$M_{\pi} = J_0 \dot{\omega}^* \quad (4)$$

求出,此处 J_0 ——转子与附加质量的惯性矩(在此实验中, J_0 比转子惯性矩 J 大 40 倍以上);当转化惯性矩 J_0 比电机转子惯性矩大很多时,要研究空载起动的过渡过程,可利用方程(4)。

实验用下述方法进行:先求出作为时间函数之电机转子角速度 ω ; 然后以时间微分求 $\dot{\omega}^* = \dot{\omega}^*(t)$, 再从这两个关系中画出图 $\dot{\omega}^* = \dot{\omega}^*(\omega^*)$, $\dot{\omega}^*$ 值乘以 J_0 值,即得电机之静态特性。

然后,进行实验求出无附加质量时转子角速度与时间的关系 $\omega = \omega(t)$ 。用一次与二次微分可求得图 $\dot{\omega} = \dot{\omega}(t)$ 及 $\ddot{\omega} = \ddot{\omega}(t)$ 。将所得数据代入式(3),则可得 $\lambda = \lambda(\omega)$ 。如此,用上述方法可以定出在转子的任何角速度下电磁时间常数值。

装置与实验

实验装置是由三相鼠笼式异步电机 1 组成的,在该电机的转子轴上紧固着测定转数与测定非均匀旋转和角速度的传递器 2, 3 及可拆卸的飞轮 4 (图 1)。

所使用的电机参数如下:

三相鼠笼式交流异步电机; 220/380 伏及 1.43/0.83 安; 0.27 瓩 (0.367 马力); 1400 转/分; 50 周波; 有效系数 = 60%; $\cos \phi = 0.75$; 重量 7.3 公斤。

为纪录电机转子角速度,使用了脉冲光电传递器。在转子轴上固定了一个柱拉铝制的圆盘,盘上有 110 个径向穿孔。自灯发出的光线通过穿孔,照射到 ИГ-3 型充气光电管上。在测定时所获得的电压为一个用来测角速度不均匀度的特制仪器所放大^[3],然后进入西門子型九綫示波器的八級迴綫上。

为测定转子每分钟的旋转数或平均速度,使用了带有偏心轮和悬臂小板的传递器,在小板上贴有电阻拉伸应变片。

飞轮与电动机转子惯性矩用三綫悬挂法求得。飞轮惯性矩 $J_{\text{Max}} = 0.688$ 公斤·厘米·秒²,电机转子惯性矩 $J_p = 0.01267$ 公斤·厘米·秒²。所有与转子一同转动的零件的总惯性矩 $J = 0.72$ 公斤·厘米·秒²。

为求带飞轮与不带飞轮的电机空载时每分钟的转数,使用了频闪观测的方法。在固定于电动机轴上的圆盘上贴了一个纸盘,纸盘上有均匀分布的四个黑点,并为氖灯所照

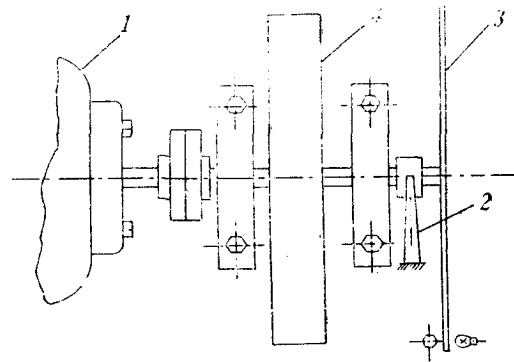


图 1

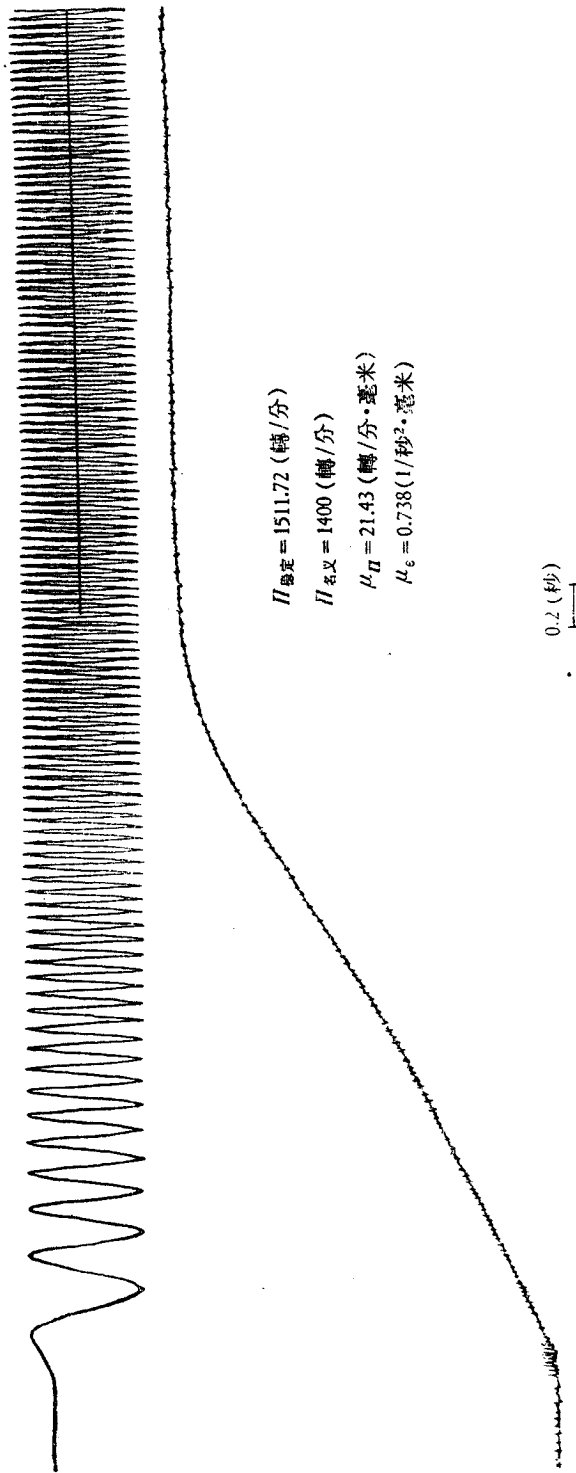


图 2

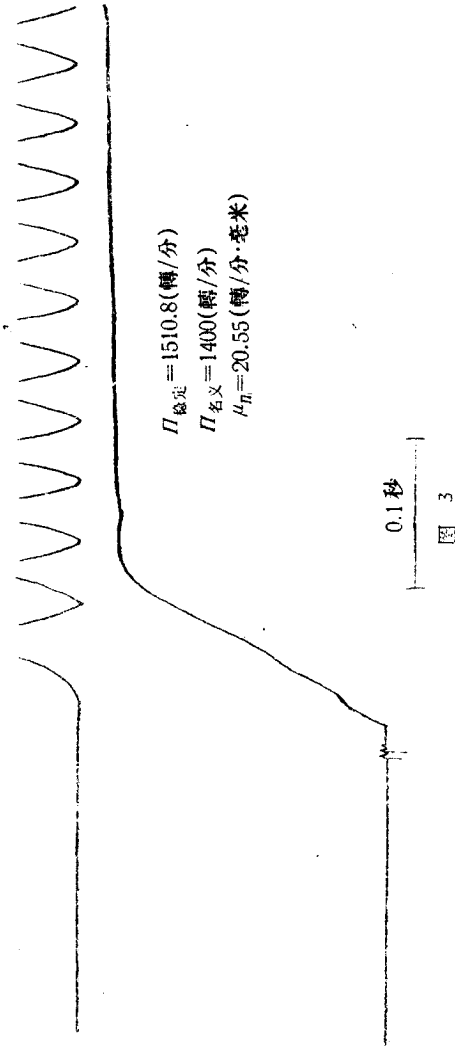


图 3

明。若电机转子每分钟转数等于 1500 转/分时, 则无惰性的氖灯闪烁每一间歇刚好相应于每一个黑点由一个位置转换 180° 角的位置上。若电机转子每分钟转数稍异于 1500 时, 则可以发现所有四个黑点都缓慢地转动, 这就有可能确定转子每分钟的同步转数与转子空载时真实转数之差。根据这一差数, 可以求出电机空载时每分钟的转数, 即使用公式:

$$\Pi_x = \frac{3000t - 60}{2t} \quad (5)$$

此处

Π_x ——电动机转子空载时每分钟转数;

t ——纸圆盘上黑点目见转动一圈所需时间。

由实验求得带飞轮时的转速 $\Pi_{x\mu} = 1498.14$ 转/分与不带飞轮时的转速 $\Pi_{xs} = 1498.0417$ 转/分。

按照上述方法获得波形图 $\omega^*(t)$ (图 2) 和 $\omega(t)$ (图 3)。应用方程 (3) 和曲线 $M_x(\omega)$ 、 $J\dot{\omega}(\omega)$ 和 $J\ddot{\omega}(\omega)$, 可求得曲线 $\lambda = \lambda(\omega)$ (图 4)。

研究一下图 4 可以得出这样的结论: 当电动机在机械特性稳定段工作的时候, 即在额定角速度范围内运转时, 电磁常数是很小的, 显然在进行动力学研究时是可以忽略不计的。

二、在外界简谐激励下电机驱动的机械动力学的研究

如著作 [1] 中所示, 当电机的静态特性工作段可以根据许可精度用直线来近似地表示时, 带有电机机组的动力学可以由下式表示:

$$F + \frac{L}{r} \frac{dF}{dt} = M_x \quad (5)$$

此处

F ——转化到电机轴上系统的外力力矩和惯性力矩;

L 及 r ——电机电枢的电抗与电阻;

M_x ——电机静态特性; $M_x = a - b\omega$;

t ——时间

若忽略电机动力学, 上述公式可用方程:

$$F = M_x(\omega) \quad (6)$$

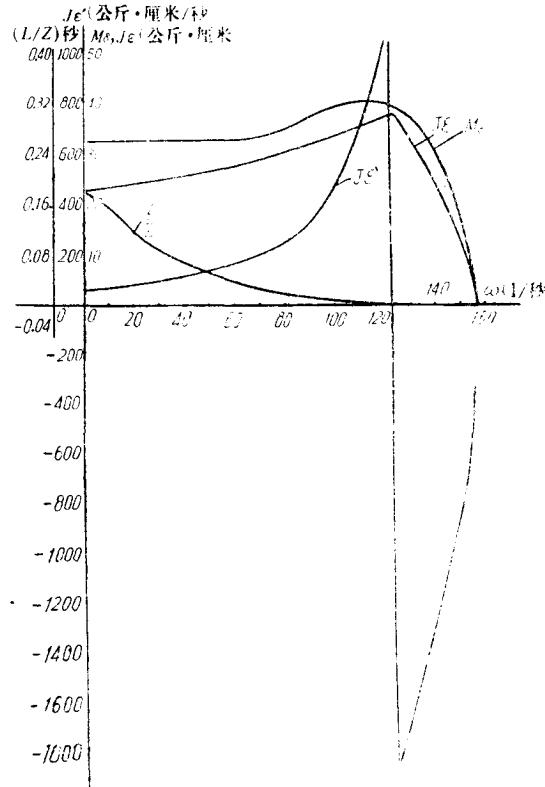


图 4

来表示。

当外界激励是时间的正弦函数时,即

$$M_0 = B_0 + B \sin \Omega t$$

(此处 B_0, B ——常数, Ω ——激励之角速度),则方程(5)可写成

$$\frac{L}{r} J \ddot{\omega} + J \dot{\omega} = a - b\omega - B_0 - B \sin \Omega t - \frac{L}{r} \beta \Omega \cos \Omega t, \quad (7)$$

经过变换,方程(7)可写为

$$\ddot{\omega} + \frac{r}{L} \dot{\omega} + \frac{br}{LJ} \omega - \frac{ar}{JL} + \frac{B_0 r}{JL} + \frac{Br}{JL} \sin \Omega t + \frac{\beta \Omega}{J} \cos \Omega t = 0, \quad (8)$$

设 $2C_1 = \frac{r}{L}$, $C_2 = \frac{br}{JL}$, $C_3 = -\frac{ar}{JL} + \frac{B_0 r}{JL}$, $C_4 = \frac{Br}{JL}$, $C_5 = \frac{\beta \Omega}{J}$, 如此则方程(8)

可写为

$$\ddot{\omega} + 2C_1 \dot{\omega} + C_2 \omega + C_3 + C_4 \sin \Omega t + C_5 \cos \Omega t = 0,$$

或

$$\ddot{\omega} + 2C_1 \dot{\omega} + C_2 \omega = -C_3 - C_4 \sin \Omega t - C_5 \cos \Omega t, \quad (9)$$

此微分方程之解为

$$\omega = e^{-C_1 t} (E_1 \cos P_1 t + E_2 \sin P_1 t) + M \sin \Omega t + N \cos \Omega t + P, \quad (10)$$

此处

E_1 及 E_2 ——由初始条件决定之常数;

$$P_1 = C_2 \sqrt{1 - \frac{C_1^2}{C_2^2}},$$

$$M = \frac{C_4(\Omega^2 - C_2^2) - 2C_5 C_1 \Omega}{(\Omega^2 - C_2^2)^2 + 4C_1^2 \Omega^2},$$

$$N = \frac{C_5(\Omega^2 - C_2^2) + 2C_1 C_4 \Omega}{(\Omega^2 - C_2^2)^2 + 4C_1^2 \Omega^2},$$

$$\rho = -\frac{C_3}{C_2}.$$

上面各式解得的右边第一项是电机枢轴角速度自由渐止振动,余三项为简谐强迫振动。

设 A 是已知外界激励角速度 Ω 下电机轴角速度振动之振幅,则可得

$$A = \sqrt{M^2 + N^2} + P = \sqrt{\frac{C_4^2 + C_5^2}{C_2^2} \frac{1}{\sqrt{\left(1 - \frac{\Omega^2}{C_2^2}\right)^2 + \frac{4C_1^2 \Omega^2}{C_2^2}}} + P}, \quad (11)$$

即

$$A = \sqrt{\left(\frac{B}{b}\right)^2 + \left(\frac{B \Omega L}{br}\right)^2} \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{\Omega^2}{\left(\frac{b}{J} \frac{r}{L}\right)^2} + \frac{J^2 \Omega^2}{b^2}}} + \frac{a - B_0}{b}, \quad (12)$$

由此可以看出此机械系统在

$$\Omega_{r \max} = \sqrt{\frac{br}{JL} \left(1 - \frac{1}{2} \frac{Jr}{bL}\right)} \quad (13)$$

时, 振幅可能最大。

用实验方法求得的 $\omega(t)$ 曲线与不考虑电磁影响时用图解法得出之 $\omega(t)$ 曲线相比较, 即可看出在电机中进行之电磁惯性对动力过程之影响。

实 验 装 置

在稳定运动中研究电磁惯性对非线性机械系统的影响, 是在图 5 所示的装置上进行

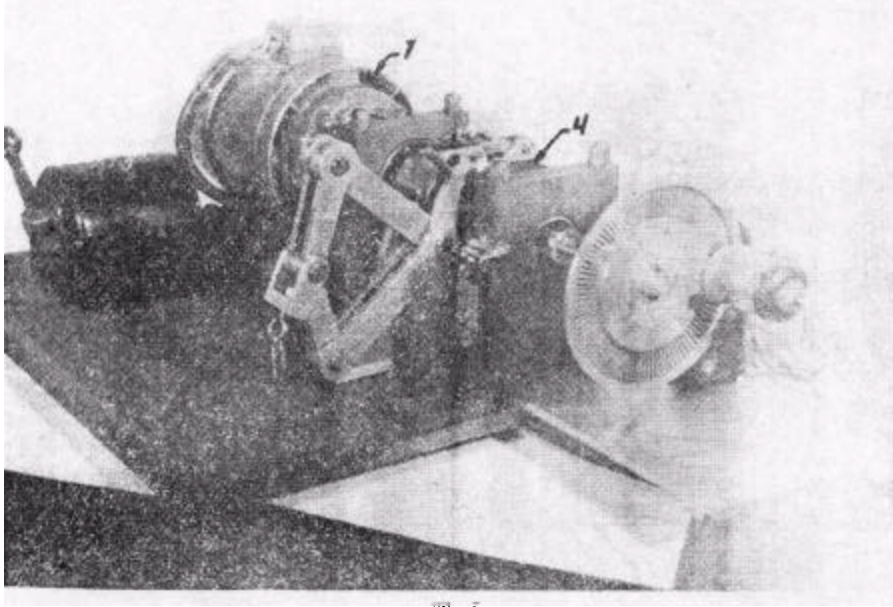


图 5

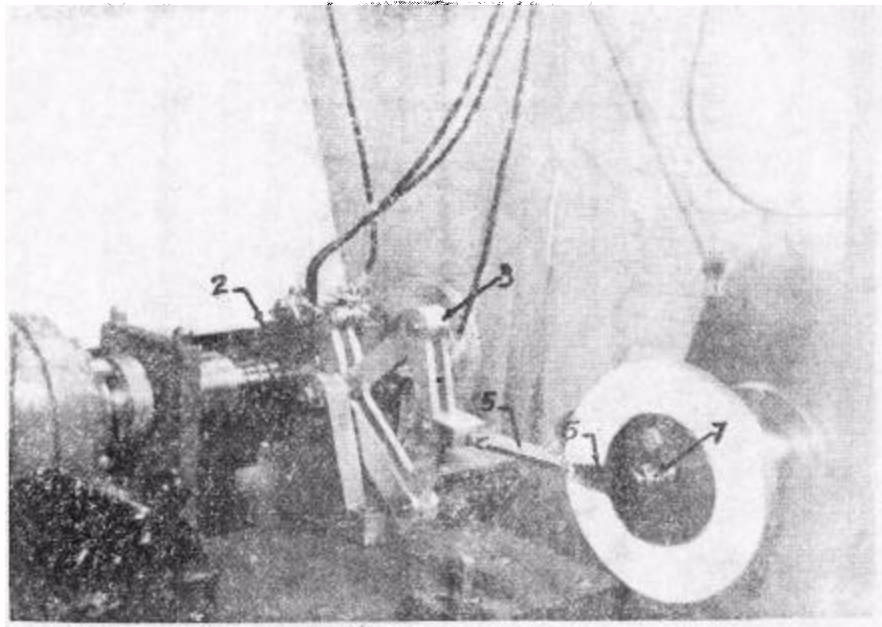


图 6

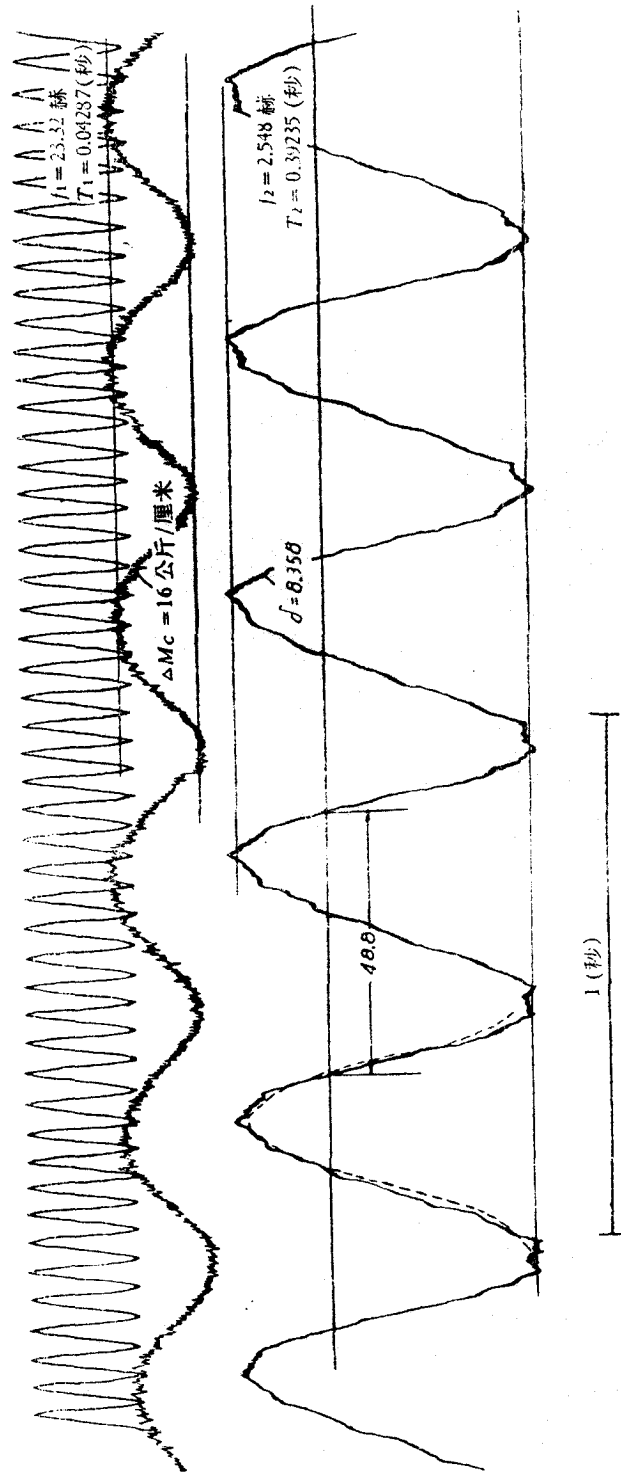


图 7

的。在此装置上负荷是由周期性简谐力形成的。

实验装置是由 0.27 瓩的三相鼠笼式交流异步电机 1 和固定在电机轴上的制动盘 2 等组成的。制动是由榫杆系统 3 并用二块特殊材料制成的牌号为 $6 \times K$ 的制动履 4 来进行的。榫杆通过一个带圆孔的小钢板 6 由弹簧 5 带动, 小钢板 6 自由地搁置在销杆 7 上, 而销杆则偏心地固定在铣床心轴的圆盘上。负荷之振幅由偏心固定着的销杆来调节。制动履对制动盘的压力值由铣床平台的横向移动来调节 (图 5, 6)。

这样, 应用在装置上的制动器能形成按正弦规律变化之阻力矩。阻力矩之振动频率可根据已知铣床心轴的角速度按级来调整, 因为心轴角速度与实验用的电动机电枢的角速度无关, 所以阻力矩可看作是时间的函数。

为了记录在上述装置中发生的运动过程, 使用了九綫示波器。从电阻丝式应变片所得之电压是由载波频率为 5000 周波的三路放大器来放大的。

在实验中要同时记录城市电网的电流频率(时间标记), 平均角速度、角速度的不均匀度, 制动履在制动盘上的压力等 (图 7)。

振幅-频率特性分析

图 8 所示的振幅-频率特性曲线 1.2 是根据 24 张波形图上的实验数据作出的。当注意到系统的振幅-频率特性有两个峰 a 及 b 时, 就可意识到, 在这两个负载频率下可能有共振现象。

为检验这一可能性, 我们选出了对应于这两个负载频率的四张波形图。应用机组运动方程可得

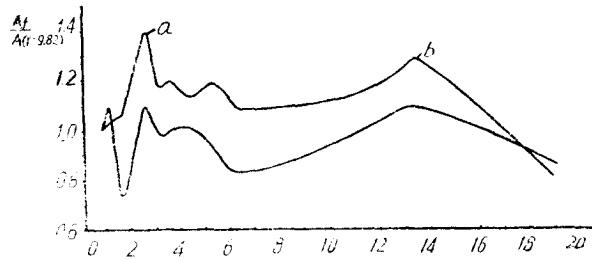


图 8

$$\frac{J\omega_i}{\Delta t} + M_{\pi i} - M_{c_{ik}} + 0.5\Delta M_{\pi} = \frac{J\omega_k}{\Delta t}, \quad (14)$$

此处

J ——机组机构各构件转化到转子轴上的等效惯性矩;

$M_{\pi i}$ ——在时间 t_i 时的驱动力矩;

ΔM_{π} ——在时间 $t_i - t_k$ 时驱动力矩的增量;

$M_{c_{ik}}$ ——在时间 $t_i - t_k$ 时阻力矩的平均值;

$\Delta t = t_k - t_i$ 时间增量。

用图解法 (见著作 [4] 189 页) 可求出在不考虑电磁惯性影响时, 转子依时间变动的角速度曲线 (图 7 中之虚线)。

把这四条曲线与相应波形图中的角速度曲线比较一下, 我们便可看到他们相互间的差别是很小的。

研究了图 7 中之曲线以后可以得出结论: 电机轴的角速度的变动仅是由于外界激励力的激励而引起的振动所决定的。电磁惯性对此振动的影响是很小的, 甚至可以忽略不

計.

参 考 文 献

- [1] Быховский М. Л., Труды ИМАШ АН СССР, Семинар по ТММ, том XVIII, вып. 71 (1958), 43.
- [2] Быховский М. Л., Зиновьев В. А. и Павлова Т. Т., Труды ИМАШ АН СССР, Семинар по ТММ, том XX, вып. 78 (1960), 33.
- [3] Панов Г. В. и Павлова Т. Т., Передовой научно-технический и производственный опыт, тема 31, № П-57-36/3, (1957).
- [4] Зиновьев В. А., 机械原理讲义, 高等教育出版社, (1959).

ДИНАМИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ С ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ

Ган Дуц-инь

Резюме

В настоящей работе рассматриваются методы экспериментального исследования влияния электромагнитной инерции трёхфазных асинхронных двигателей на их переходные процессы, подробно излагаются экспериментальные процессы и применяемые в них установки. Проведя анализ всех данных, полученных из экспериментов, настоящая статья показывает, что при работе двигателя на устойчивой части механической характеристики, т.е. в окрестности номинальной угловой скорости электромагнитная постоянная мала, поэтому в динамических расчётах ею можно пренебрегать.

Кроме того, в данной работе было проведено экспериментальное исследование динамики механической системы с внешним гармоническим возбуждением. При этом полученные результаты показывают, что колебания угловой скорости вала двигателя определяются только колебаниями, возбуждаемыми возмущающей внешней силой. Электромагнитная инерция на эти колебания оказывает настолько незначительное влияние, что им практически можно пренебречь.