

高等学校教学用书



微电机研究

(电机实验参考书)

苏联莫斯科动力学院
电机教研组编

01
41442

高等教育出版社

本書系根据苏联莫斯科动力学院 (Московский энергетический институт имени В. М. Молотова) 1953年出版的該院电机教研組編写的“微电机研究 (电机实验参考書)” (Исследование электрических микромашин, пособие к лабораторным занятиям) 譯出的。

本書共包括六个实验: 实验一是通用异步微电动机的研究, 实验二是具有空心轉子的伺服异步电动机的研究, 实验三是直流伺服电动机的研究, 实验四是测速发动机的研究, 实验五是轉动变压器的研究, 实验六是自整角机的研究。实验一和实验二是技术科学副博士罗普辛娜 (Е. М. Лопухина) 編写的, 实验三和实验四是技术科学副博士宋米辛娜 (Г. С. Сомихина) 編写的, 实验五是技术科学副博士阿烈山 (Г. Л. Арешин) 編写的, 实验六是技术科学副博士幼法罗夫 (Ф. М. Юферов) 編写的, 本書的主編者是契契特 (Ю. С. Четт) 教授。

本書可供高等学校、厂矿企业及科学研究机关在进行微电机实验及研究时参考。

微 电 机 研 究

苏联莫斯科动力学院电机教研組編
交通大学(西安部分)电机原理教研組譯
高等教育出版社出版 北京宣武門內承恩寺7号
(北京市書刊出版業營業許可証出字第054号)
外文印刷厂印訂 新华書店發行

統一書号15010·584 89本850×1168 1/32 印張3¹⁸/₁₆
字數 106,000 印數 0001—3,600 定價(7) ¥ 0.55
1959年3月第1版 1959年3月北京第1次印刷

序

这本微电机实验参考书，主要是为电气真空技术和仪表制造系(ЭВПФ)学生在“计算装置用微电机”课程和电机系(ЭМФ)学生在“自动装置用微电机”课程中应用。这种情形也就决定了本资料所研究的微电机实验的选择。

考虑到这些型式电机的资料十分缺乏，作者在每一个实验中简短叙述了被研究的电机，其特征和某些理论前提。

每一个实验包括的内容，在于能够容易地贯穿教学过程的基本概念，这些基本概念是与尽力发展并鼓励学生的科学研究工作的必要性关联着的。

实验步骤中标有星号(*)的各项，教师可根据学生系别和专业予以采用，各专业的学生也可以按照自己的爱好加选采用。

在这本参考书中描述的很多量测和辅助机械，是微电机实验室工作人员亲手制造的。也必须指出，我们一开始工作，就广泛地吸引学生来参加科学研究工作。尤其是，现在实验室用的某些仪表是学生制作的。例如：电子瓦特计是学生B. И. 吉阿诺夫-克洛考夫计算和制造的，闪光测频转速表是学生H. К. 克拉斯诺戈洛夫制造的，闪光测频装置是学生Г. И. 吉西奇和Л. Э. 吉列尔制造的。研究生Г. Л. 阿拉山，Ф. М. 尤费罗夫，A. M. 兰金在发展微电机的理论及研究上投入了很多劳动。

第一次编写这样的实验指示书，不可能完全免除这样或那样的缺点，这是很自然的。然而作者们认为，对于接触到电机制造中这一非常有趣而又相当困难的部门的人们，这本资料会给他们一定益处。

科学技术博士 Ю. С. 契契特教授

目 录

序	v
微电机实验方法	1
电量的量测	1
电流的量测	2
电压的量测	2
功率的量测	2
微电机转矩的量测	5
测量转矩基本方法的分类	5
I. 用制动力矩测转矩	7
II. 根据在逸转过程中的加速度测量转矩	16
微电机转速的量测	18
转速计	18
转速发电机	19
用频率发送机测量转速	19
用闪光测频器法测转速	20
参考书刊	21
实验一、通用异步微电动机的研究	22
实验顺序	27
实验的说明与指示	28
参考书刊	39
实验二、具有空心转子的伺服异步微电动机的研究	41
实验程序	51
实验说明与指示	52
参考书刊	60
实验三、直流伺服电动机的研究	61
基本特性	62
实验步骤	67
实验说明与指示	68
参考书刊	71
实验四、测速发电机的研究	72
1. 直流测速发电机	73

2. 交流測速發電機	74
1. 同步測速發電機	74
2. 空心轉子測速發電機	75
實驗步驟	78
實驗說明與指示	79
參考書刊	81
實驗五、轉動變壓器的研究	82
實驗步驟	84
實驗說明與指示	85
參考書刊	94
實驗六、自整角機的研究	95
最簡單的同步聯系電路結構與工作情況簡述	97
無接觸的自整角和簡述	101
實驗步驟	104
實驗說明與指示	106
參考書刊	114

微电机实验方法

当试验微电机时，不得不量测十分微小的量，使得量测装置和仪表所需的功率和被试电机的额定功率相差不多。此外为避免发热的影响，还必须在短时或短暂的工作情况下进行试验。绕组发热会严重地影响电机特性，因此实验应当尽可能控制在同一温度下进行。所有这些原因就使得微电机的试验方法和一般电机有所区别。

这一章的目的是研究微电机试验的基本特点，这些特点在测定电量（电流，电压，功率）和非电量（转矩，转速）时都存在。

电量的量测

在研究微电机时必须同时量测电流，电压和功率。因此，由于所用仪表本身要消耗功率，误差是不可避免的。

在作微电动机，尤其是交流微电动机试验时，要量测的量接近于一般仪表的灵敏度，这时误差更为显著。因此要准确的实验小电机，必须：第一，采用特殊仪表；第二，对仪表由本身消耗功率所引起的误差作校正；第三，采用的仪表连接线路应使仪表消耗的影响最小。

共有十八种可能连接电流计，电压计及瓦特计的方式。其中应采用图1的两种方式，在测量功率时，误差乃由于电流计及瓦特计电流线圈电阻电压降而来，电压直接在被试电机上测量，所量电流等于被试电机电流（伏特计消耗功率很小）。伏特计的消耗功率可借切去被试电机后由瓦特计测得。

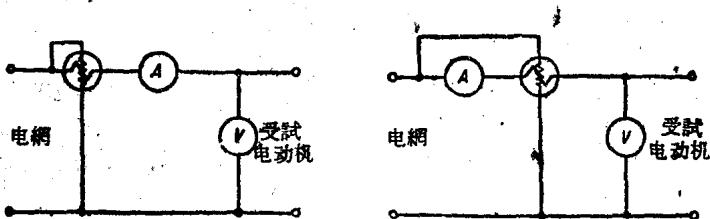


图 1：同时量测电流电压及功率时仪表连接的建议方式。

当电机试验电压为 110 伏，电流计及瓦特计的电流线圈电阻电压降近于 2 伏，按所建议的接线方式测量功率时，误差近于 1.5%，故可以认为是允许的。

当电压大于 110 伏，负载电流小于电流计及瓦特计量程时，误差将会更小。当电压

小于 110 伏时, 量测功率的误差将会增加, 在这种情况下应当考虑在测量的结果中引入相应的校正。

在作微电动机研究时, 必须估计量测功率的误差值。必要时对仪表消耗功率加以校正, 其值等于

$$P_n = 3I^2(R_A + R_W) \quad (1)$$

式中: I — 电流;

R_A, R_W — 电流计电阻及瓦特计电流线圈电阻。

在三相系统中, 量测仪表连接法与上述完全相同, 即电压计连接于被试电机端, 瓦特计电压线圈接于电网。测量功率用具有瓦特计换接器的瓦特计, 测量电流用两电流计测量。为了研究实验准确计, 在未接入电流表及瓦特计电流线圈的相中, 常须接入平衡电阻(电感的及电阻的), 以免因电流计及瓦特计电流线圈较大的电阻电压降所造成的电压不平衡, 这种电压降当电流为 0.5 到 2 安时即相当显著。仪表由一相换接到另一相时, 平衡电阻也应相应的换接。

电流的量测

在量测 1 安以下的电流时, 建议采用检流计, 和其他仪表比较起来, 这种仪表消耗功率很小。此外这种仪表有多种量程(例如 100 250 1000 毫安), 因此可用以研究电动机的不同工作情况。电研式及电动式安培计最低量程可以认为是 100 毫安(额定刻度值), 但是在这个量程上功率的消耗比较大。

对于量测超过 1 安的电流时, 可以采用标准电流计, 电研式及电动式均可, 量程为 2.5—5 安及 5—10 安。在额定电流时电压降落不应超过 0.5 到 0.7 伏。

电压的量测

测量电压时建议采用这样的电压计, 使能以忽略本身的功率消耗(电压计电阻不应小于每伏 500 到 1000 欧姆)。检流式及电子式电压计能满足这样的要求。因此这两种仪表都可用在微电机实验中。最好采用检流电压计, 因为这种电压计较为准确, 紧凑, 也更适合于工作。

功率的量测

在测量功率时应选择这样的仪表, 它的功率消耗小, 功率因数 $\cos \varphi$ 在 0.2 到 1.0 时, 相的误差小。因为要用同一仪表测量被试电机在不同状态下的功率, 所选择的瓦特

計电压及电流的程数应当多。

額定电流超过 0.5 安时建議采用电动式瓦特計。

电流小于 0.5 安必須采用特殊瓦特計。莫斯科动力学院电气仪表制造教研組所制造的瓦特計就是一种。与一般瓦特計相反,这种仪表动圈接于电流电路,而不动圈经过附加电阻接于網絡电压。这种瓦特計电流量程为 100 到 200 毫安,电压到 30 伏,用附加电阻后到 120 及 240 伏。

电流繞圈电压降在量程为 100 毫安时为 0.415 伏, 200 毫安时为 0.438 伏。

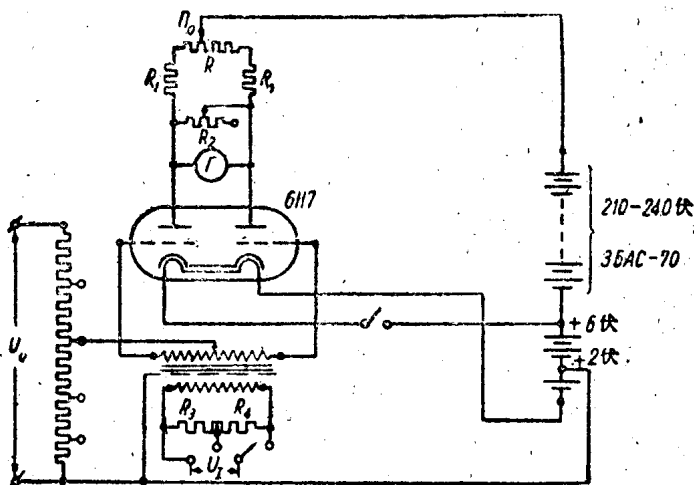


圖 2. 电子式瓦特計接綫圖。

測驗功率同样可以采用莫斯科动力学院电机教研組設計和製造的电子式瓦特計。

电子式瓦特計用以測量十分小的功率(由十分之几瓦到几瓦)具有較大的頻率范围 50, 500 赫芝。瓦特計的作用原理如下: 如圖 2 所示, 在电子管 6H7 柵極引入正比于測量电压 \$U\$ 及电流 \$I\$ 的电压 \$U_U\$ 及 \$U_I\$。其中一个电压同相地作用在两个柵極上(如圖中的 \$U_U\$), 另一个反相地作用于二柵極上(\$U_I\$)。若以 \$U_{g_1}\$ 及 \$U_{g_2}\$ 表示作用于柵極上的合成电压, 由圖 3 的矢量圖得:

$$U_{g_1}^2 = U_U^2 + U_I^2 + 2U_U U_I \cos \varphi \quad (2)$$

$$U_{g_2}^2 = U_U^2 + U_I^2 - 2U_U U_I \cos \varphi. \quad (3)$$

因为电子管工作点在抛物綫弯曲部分, 阳极电流和柵極电压的关系就可以足够准确地以柵極电压的三次多项式表示出来。

$$i_{a_1} = a_0 + a_1 U_{g_1} + a_2 U_{g_1}^2 + a_3 U_{g_1}^3 \quad (4)$$

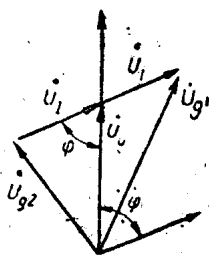


圖 3. 矢量圖。

$$i_{a_2} = a_0 + a_1 U_{\beta 2} + a_2 U_{\beta 2}^2 + a_3 U_{\beta 2}^3. \quad (5)$$

檢流計置于电桥的两对角間，因此，通过檢流計的电流是二阳極电流直流分量之差。多项式中奇数次指数項不产生直流电分量，因此仅余 $a_0, a_2 U_{\beta 1}^2, a_2 U_{\beta 2}^2$ 項。

不变分量 a_0 为电位計 II 所补偿(調整零点)，而其差

$$a_2 U_{\beta 1}^2 - a_2 U_{\beta 2}^2 = i_{a_1} - i_{a_2} = \Delta i_a = a_2 4 U_U U_I \cos \varphi = k P_{акт}. \quad (6)$$

使瓦特計指針偏轉，偏轉的大小正比于有效功率 $P_{акт}$ 。

当 U_U 和 U_I 不是正弦波时，仪表指示出所有諧波的有效功率。仪表的准确度为 2-3%。这种瓦特計实际上不需要由測量电路供給功率。瓦特計刻度在每次試驗前，用标准电阻校对。每刻度的瓦数为

$$\frac{U^2}{\alpha R_g} \text{ (瓦特)}$$

式中： U ——作用于标准电阻 R_g 的电压；

α ——瓦特計指針偏轉的刻度数。

使用仪表的詳細指示見專門材料，那里也給出其参数。

在測量几个瓦特的交流电动机功率时，有时必須应用电子示波器(圖4)。功率根据李沙如(Лисажы)圖形求得的 $\sin \varphi$ 决定。

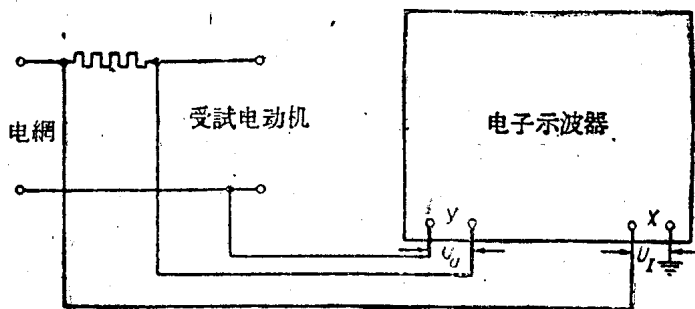


圖 4. 用电子示波器測功率的连接圖。

在示波器的一对極板上，引电压 U 正比于欲測功率的电路电流。为此在此电路須接入一不大的电阻。

在另外一对極板上，引欲測功率的电路电压 U_U 或正比于此电压的电压。在示波器屏上将示出李沙如圖，在一般情況下，当电压为正弦波时，圖为橢圓形。

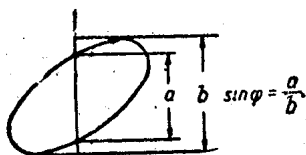


圖 5. 根据李沙如圖測功率。

$\sin \varphi$ 由李沙如圖形决定：

$$\sin \varphi = \frac{a}{b} \quad (7)$$

a 与 b 如圖 5 所示。

在实际操作中，当没有电压作用于 x 極片时，在垂綫上决定 b 的大小，然后在不变 φ

軸放大倍数的同时,在 α 極片上加电压并在垂軸上測量 α 綫段。

同样可以采用可变电容測量功率(圖6)。

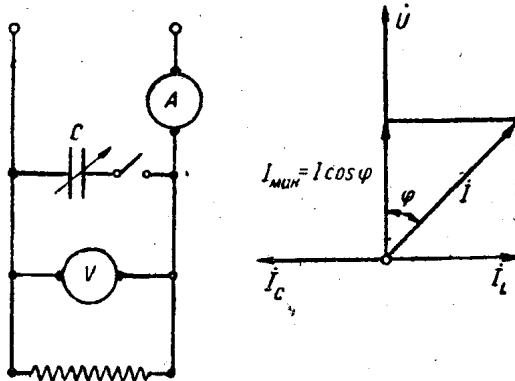


圖 6. 用可变电容測定功率。

此种測量功率的方法,基本原理是用电容电流补偿研究电路的电感电流。用以測量总电流的安培計的最小电流为电流的有功分量 $I_{MUN} = I \cos \varphi$, 当切去电容时,安培計給出电机的全部电流 I 。

$$\cos \varphi = \frac{I_{MUN}}{I} \quad (8)$$

而电路功率

$$P = UI_{MUN}. \quad (9)$$

微电动机轉动力矩的測量

測量微电动机轉动力矩是很复杂的问题,因为:

1. 在某些情况下,电动机轉动力矩带有不稳定的特性;
2. 对于某些型式的电动机,在由基波磁場建立的 $M=f(n)$ 曲綫上,有附加力矩疊置而造成小波动。例如,在异步电动机力矩曲綫上,有由高次諧波磁場引起的波动(即所謂同步及异步的附加力矩);
3. 对微电动机微小的力矩測量的准确度而言,制动結構轉动部分的空气摩擦和其他重要因素(例如温度、湿度等)有严重的影响。

測量轉动力矩基本方法的分类

电动机的轉动力矩特性可由两种方法获得:根据制动力矩測定轉动力矩的測量装

置屬第一类。根据电动机遯轉加速决定轉动力矩的測量装置屬第二类。

在工作过程中电动机产生的力矩等于

$$M = M_c + M_j = M_c + \frac{GD^2}{375} \frac{dn}{dt} \quad (10)$$

式中: M_c —相应于由系統中取去的能量的静态力矩(阻力矩);

M_j —相应于轉动質量的能量的动态力矩(加速力矩);

n —电动机轉速以轉/分表示;

GD^2 —轉动質量的轉动慣量。

当电动机遯轉时,一般轉动力矩是轉速及其导数(加速度)的复杂函数:

$$M = F(n, n') \quad (11)$$

測量轉动力矩的第一类方法基于当 $M_j \approx 0$ 时測量 M_c 的值,而第二类方法是当 $M_c \approx 0$ 时測量 M_j 。

在第一类方法中($M_j = 0$ 及 $M = M_c$),力矩是在轉速固定($n = \text{定值}$),而加速度为零($n' = 0$)的各点測定,因此这个方法最适于得到力矩仅与轉速的关系 $M = f(n)$ 。

要在每一点上測量力矩,电动机在試驗过程中会發热很厉害,因此轉动力矩曲线会受到歪曲,而在大容量电机中会給整个电机带来危險。

当用第一种方法測定轉动力矩时,在所有电动机轉速情况下,必須遵守下列条件:制动裝置的轉矩特性 $M_m = f(n)$ 的陡度应当大于受試电动机轉矩特性 $M_d = f(n)$ 的陡度(圖 7)

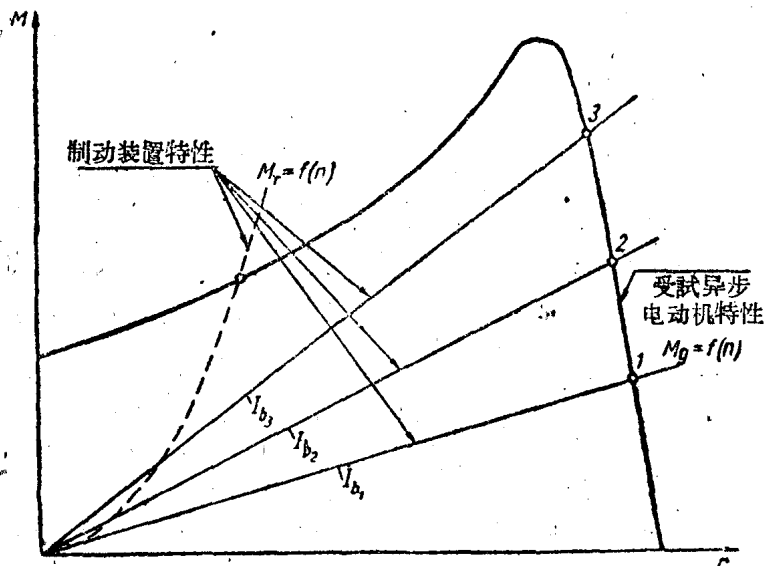


圖 7. 第一类类型的制动裝置制动力矩与轉速的关系 $M_m = f(n)$ 。

$$\frac{dM_m}{dn} > \frac{dM_0}{dn}, \quad (12)$$

式中: M_m —制动装置的制动力矩;

M_0 —受试电动机的转动力矩。

当用第二种方法测定转动力矩时,应当看到 M_f 与转速 n 的变化有关。当 $M_0=0$, 方程式(10)转变为:

$$M_f = \frac{GD^2}{375} \frac{dn}{dt} = \frac{GD^2}{375} n', \quad (13)$$

式中 GD^2 为转动系统的转动惯量。

若电动机转速 n 是个变数,转动力矩将由方程式(11)决定。

转速及加速度的任何波动均会引起电动机电力矩曲线的歪曲。

然而借引入附加惯性质量,速度及加速度的波动在转矩曲线上引起的高次谐波的影响可以减小到能忽略的程度。

应当注意,用第二种方法测转矩时,电动机发热影响比制动方法要弱的很多。此外用第二种方法容易记录转矩曲线上的波动。

I. 用制动力矩测转矩

在莫斯科动力学院微电机实验室试验微电动机时,采用了属于此种测量转矩方法的各种不同型式的制动装置。

1. 具有弹簧测力器的机械制动器。由图8及图9可以看出在被试电动机轴上装有一个滑轮,围绕滑轮绕着一条细绳,其上端接在固定在柱上的弹簧测力器的挂钩上,绳的另一端接在装有重物的盘上。

电动机的转矩等于重物的重量与测力器示数之差乘以滑轮的半径:

$$M = (F - Q)r. \quad (14)$$

这种方法建议用于功率仅数瓦的微电动机。超过10瓦,这种制动器不适用,因为由于不可避免的发热,使细绳对滑轮的摩擦系数变更,制动器的工作将不稳定。

2. 具有摆锤的机械皮带制动器。图10及图11表示具有摆锤的机械皮带制动器的外形和示意图。

制动器由一个空心滑轮1,与滑轮固定连接的摆锤2(是一个可动的重物),指针3,杠杆4及刻度5所构成。制动器的空心滑轮装在支架6的滚珠轴承上。

在被试电动机轴上装着第二个空心滑轮,并用布带与制动器的滑轮连接起来。带的两端固定在制动器的滑轮上。

通过手压杠杆拉动滑轮和摆锤而产生的带上的拉力,作为被试电动机的负荷。

与指针固定连接的摆锤将转动到与带与滑轮间的摩擦力所平衡的位置。被试电动机转矩由指针在刻度上偏转角测定。

转矩大小的量程可用变更摆锤的大小和位置,与在被试电动机上应用不同直径的

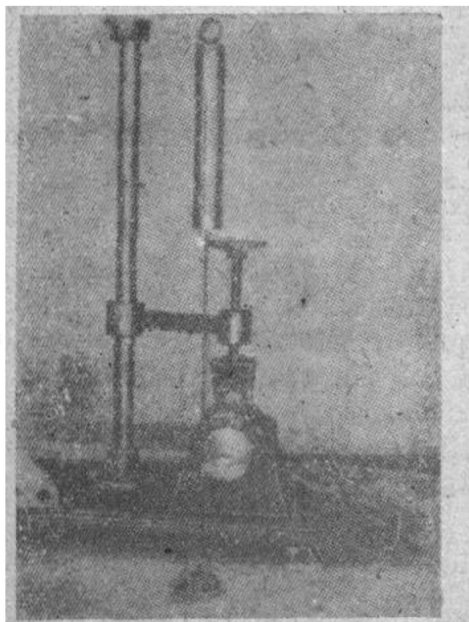


圖 8. 具有彈簧測力器的制動器的外形。

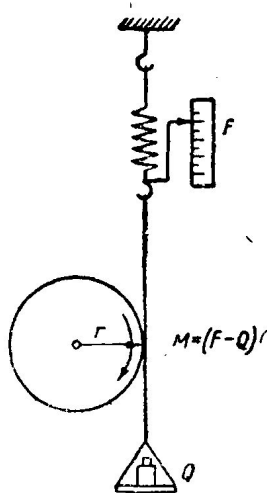


圖 9. 具有彈簧測力器的制動器示意圖。

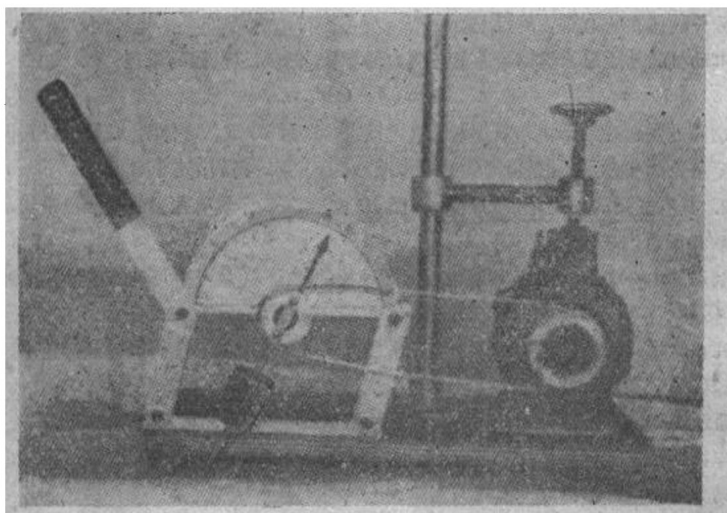


圖 10. 具有擺錘的機械皮帶制動器的外形。

滑輪來調節。

借懸于制動器滑輪皮帶上的荷重來進行制動器的刻度劃分。單位刻度指示值為作用于電動機軸上的轉矩與指針在指標所指的刻度數之比：

$$1 \text{ 度} = \frac{M_0}{k}$$

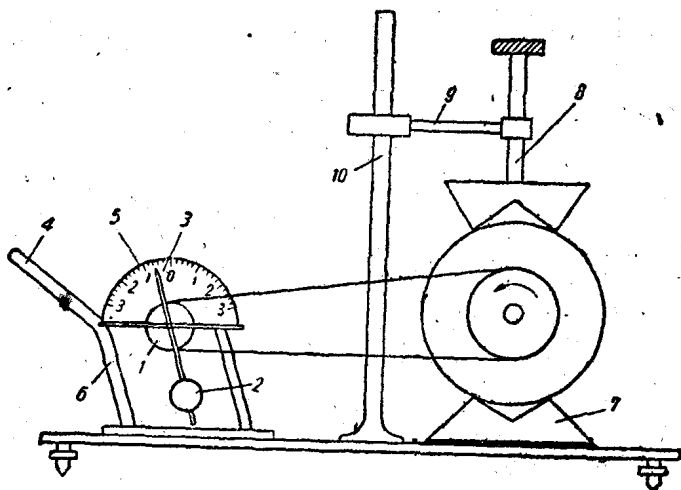


圖11. 具有擺錘的機械制動器示意圖。

式中： k ——指標刻度數

$$M_0 = M_m \frac{r_2}{r_1} = G_1 r_1 \frac{r_2}{r_1} = G_1 r_2 \text{——在電動機軸上的轉矩；}$$

M_m ——作用于制動器軸上的轉矩；

G_1 ——劃分刻度時所用的荷重；

r_1 ——制動器滑輪半徑；

r_2 ——被試電動機滑輪半徑。

在開始實驗電動機之前，恰當的校正制動器，調整可動的擺錘荷重，使被測轉矩達最大值時，指針也指到最大刻度數。例如，對异步電動機最大的刻度數應相當于最大轉矩。

在量測轉動力矩時，如圖 11 所示，被試電動機與皮帶制動器固定于一個底座上。電動機借用浸以樹脂的布層(текстолит)制成的襯墊 7，压紧螺旋 8，撐架 9 及支架 10 裝于底座上。

上述具有擺錘的皮帶制動器，建議用于功率在 500 瓦以下，轉速變動較大的微電機試驗。當量測超過 100 瓦的電機轉矩時最好用石墨油塗在相互摩擦的平面上。

制動器不能用于測量异步電動機 $M = f(n)$ 曲線上不穩定部分的力矩。

圖 12 示用于功率在 10 瓦以下的摆錘制动器的外形。这种制动器的特点是：繞在制动器空心滑輪及被試电机上的繩索借压紧螺旋而拉引。

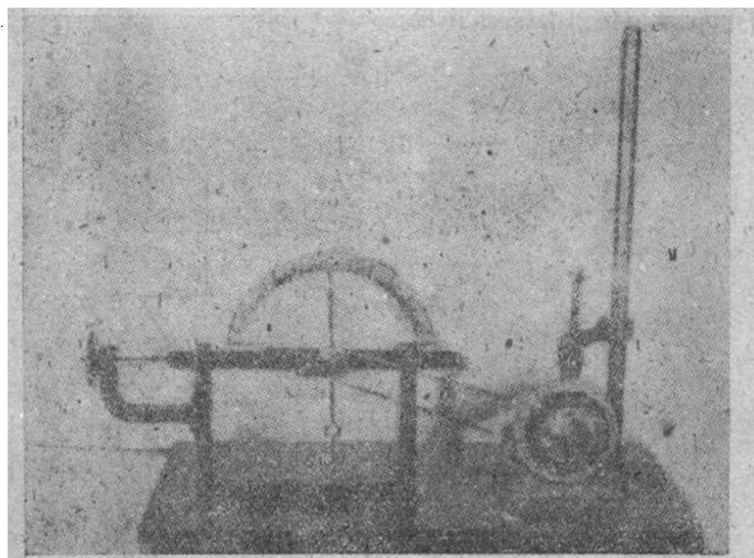


圖 12. 功率在 10 瓦以下电机使用的摆錘制动器的外形。

8. 电磁制动器

电磁制动器是这样的一种装置，其制动力矩的产生，在于轉动圆盘中的渦流与电磁鉄錘互相作用。

目前所知的电磁制动器有很多种，在莫斯科动力学院微电机实验室应用其中的两种。

此类制动器的一种外形如圖 13 所示。

这种制动器的主要构件为：以橡皮管連到被試电动机軸上的一个圓鋁盘，及一組固定于圓环上的电磁鉄，这个鉄裝于滾珠軸承上并能沿圆盘轉动方向轉动。在圓环上裝置一个重錘及一个用以在靜止的指标上指示重錘的偏轉角的指針。由渦流产生的制动力矩傳給帶电磁鉄的圓环，并使这个圓环轉动到重錘偏轉至能平衡电机轉矩的位置。根据重錘指針在指标上的偏轉角以决定轉矩的大小。

电磁制动器具有下列的优点：使用方便；通过电磁鉄繞圈激磁电流的調节可以平滑地变动負荷；可以直接由指标上計算出轉矩值；可以借連接圓盘与圓环的制动装置来測量电动机的启动力矩。

电磁制动器的量程可以通过更换重錘上的負重而改变。然而这种極限受电磁鉄繞圈中允許的最大电流值和磁系統中的飽和度所限制。

圖 13 示用于測量轉矩到 200 克-厘米的电磁制动器。电磁鉄繞圈最大允許具期电

流为0.4安,短暂电流为1安。

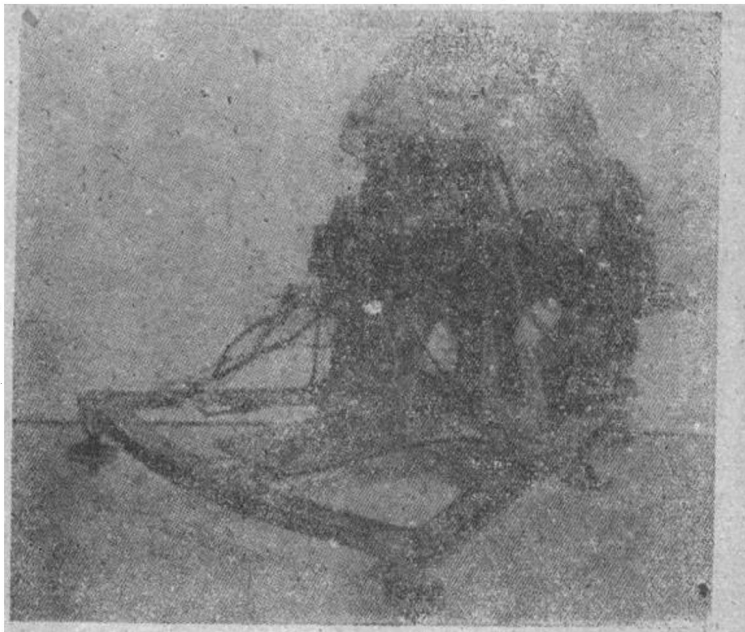


圖 13. 黑色冶金工业部自动化研究所制造的电磁制动器的外形。

上述结构的制动器的缺点为: 在低转速时制动力矩减低, 因此不可能在低转速时给电动机加负荷; 在高转速时圆盘发生振动; 空气阻力影响转矩测量的准确性。由于空气和圆盘摩擦的损失而产生的测量转矩的误差可以用校正系数来校正。

电机教研组由工程师 M. A. 巴娜新考夫所制的电磁制动器部分地消除了上述缺点, 能测出异步机转矩曲线不稳定部分(特殊改进)及扩大测量范围[4]①。圖 14 表示这种制动器它可以测量转矩力矩达 3000 及 20000 克-厘米。

4. 用鋼彈簧和闪光测频计数器的测量耦合器。为了测量转速变化很大的特性曲线 $M=f(n)$ 上任何部分的转矩, 莫斯科动力学院微电机实验室制成一种特殊测量耦合器。

具有测量耦合器的制动器装置包括下列构件: 作为负荷的直流发电机; 测量耦合器; 两个量测的圆盘。

作为负荷的发电机是他激的, 可以广泛地调节激磁, 其负荷为变阻器。

在不同的激磁电流下, 发电机制动力矩与转速的关系, 可以用通过坐标原点并与横坐标倾斜的直线系表示, 其倾斜度决定于激磁电流 J_a 的值(圖 7)。发电机制动转矩

① 方括号内的数字系指参考书目序号——編者注。

曲綫的陡度可以借改接發电机为自激而升高(見圖 7 虛綫)。增加制動發电机轉矩曲綫 $M_m = f(n)$ 的陡度可以測出被試电动机轉矩曲綫不穩定部分。

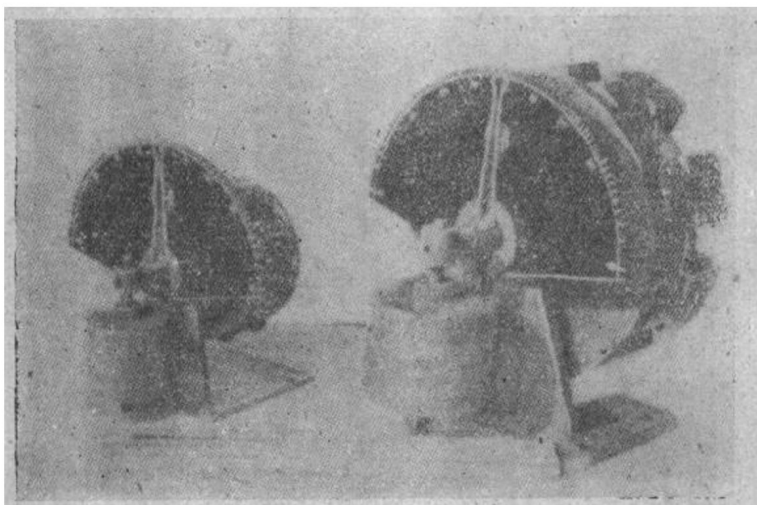


圖 14. 巴那新可夫工程師制造的電磁制動器的外形。

測量偶合器(圖 15)連接了被試电动机和作为負荷的發电机,也就是將裝在两个电机軸上的套筒突出物 1 連接起来的一个螺旋彈簧。

作用于偶合器的电动机轉矩引起彈簧扭轉一个角,其大小正比于轉矩。为了測量

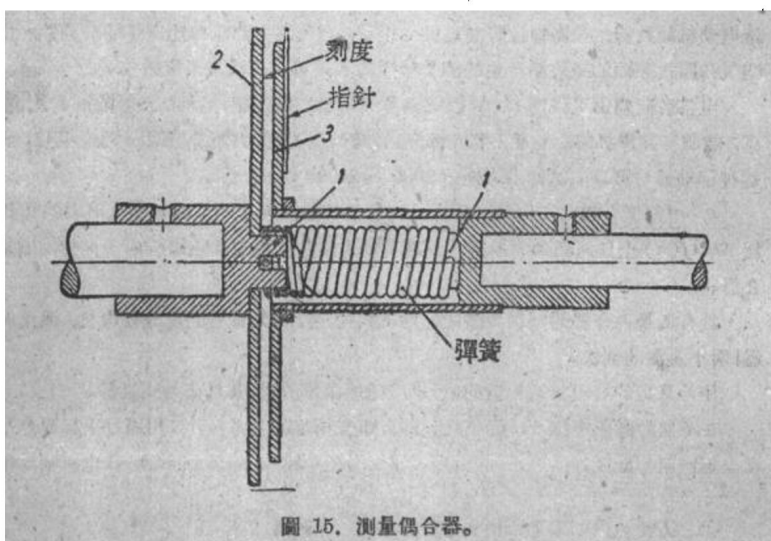


圖 15. 測量偶合器。