

感应电动机的 試驗法和特性分析

顧 时 希 編

机械工業出版社

46-53

感应电动机的 試驗法和特性分析

顧 时 希 編



机械工业出版社



出版者的話

本書敘述感應電動機的試驗方法，介紹怎樣從試驗中求得數據，對它進行特性分析。內容包括各項基本要素：如電阻、轉速和溫度的測定法，試驗室中應具備的儀表和設備，對絕緣試驗、無負荷試驗、輕載試驗、負荷試驗、雜散負荷耗試驗和溫升試驗等的工作法及電動機的特性分析。此外，還指出了電動機在運轉中的注意事項和合理使用的方法。

本書可作電動機試驗室和工廠中電氣技術人員的工作手冊，也可作專業訓練班教學上的參考書。

NO. 1366

1957年12月第一版 1958年5月第一版第二次印刷

787×1092 $\frac{1}{32}$ 字數61千字 印張2 $\frac{13}{16}$ 2,301—5,390冊

機械工業出版社(北京東交民巷27號)出版

西單印刷廠印刷

新華書店發行

北京市書刊出版業營業許可證出字第008號 定價(10)0.46元

序

随着国家大规模经济建设工作的發展，感应电动机应用的範圍日益广闊，由它所消耗的电力也日益增加。过去，在許多工厂中，由于沒有注意到电动机的容量和实际負荷狀況的配合問題，以及工作时电压和頻率等的变化对它的特性的影响問題，因此，無形中浪費了許多电能。为了避免这些缺点，使用者应该对感应电动机的特性有明确的認識，以便發揮它的最高工作效率，达到合理使用的目的。

編者希望通过本書的出版，对合理使用感应电动机方面能够有所帮助。

本書內容，只叙述三相感应电动机特性的試驗和分析。因为，在所有电动机中，它占着最重要的地位。在工厂中几乎百分之八十以上用的是感应电动机。因此，对它的試驗和分析特別感到需要。

由于編者学識淺薄，錯誤之处想必难免，希望讀者不吝賜教。

編者

目 次

序.....	3
第一章 各項基本測定.....	5
1 电阻的測定.....	5
2 轉速的測定.....	13
3 溫度的測定.....	18
第二章 試驗設備.....	25
4 試驗室中电源的設備.....	25
5 电源綫路上儀表的裝置.....	28
6 電動机的負荷設備.....	35
第三章 試驗項目和試驗方法.....	41
7 絕緣試驗.....	41
8 無負荷試驗和輕載試驗.....	51
9 負荷試驗.....	55
10 雜散負荷耗試驗.....	59
11 溫升試驗.....	65
第四章 特性分析.....	72
12 感應电动机的工作原理和向量圖.....	72
13 用圓圖法求感應电动机特性.....	77
14 用等值綫路圖法求感應电动机特性.....	87
主要参考文献.....	90

第一章 各項基本測定

1 电阻的測定

感应电动机的定子繞組、轉子繞組（卷繞式）的直流电阻值和絕緣电阻值，在电动机的特性分析和安全運轉上，占很重要的地位。因此，在試驗电动机时，必先記錄這兩項数值。为了要得到正确的測定数值，首先要有正确的測定方法。由于各种电阻的測定方法不是完全相同的，比如，适用于絕緣电阻測定的方法，并不能适用于低值电阻的測定。因此，正确的測定方法，必須是根据电阻值的大小，采用各种不同的測定方法。电阻值大小的分类，一般是采用下面三种：

一、高电阻 电阻值在10万欧和10万欧以上时称为高电阻。所有电动机的絕緣电阻值都在这个範圍內。測定絕緣电阻的方法，应当采用高电阻測定法。

二、中电阻 电阻值在1欧以上，10万欧以下时称为中电阻。中型和小型电动机的定子繞組及一部分小型滑环式感应电动机的轉子繞組，它們的直流电阻值在这个範圍內，測定这些电动机的直流电阻值时，应当采用中电阻測定法。

三、低电阻 电阻值在1欧和1欧以下时称为低电阻。大型电动机的定子和轉子繞組的直流电阻值在这个範圍內。測定这些电动机的直流电阻值时，应当采用低电阻測定法。

上述分类的目的，只是为了叙述的方便。因此，电阻值大小的範圍是可以伸縮的。現在，把这三种电阻測定法分別叙述

如下：

一、高电阻测定法 感应电动机絕緣电阻的測定，必須利用高电阻測定法来解决。因为絕緣体的性質，用电气观点来分析时，它的特性完全可以用高电阻和电容的等值綫路圖来表示。如圖 1 所显示的就是絕緣体的等值綫路圖。圖中： R 是高电阻，代表絕緣体內部絕緣电阻和表面泄漏电阻之和。 C 是电容器，代表絕緣体的电容。 r 是低电阻，代表电容器充放电时的损失电阻。从圖 1 中可以看出：当直流电压 U 加在絕

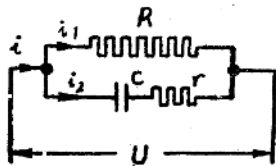


圖 1 絕緣体的等值綫路圖。

緣体上时，絕緣体上所通过的总电流 i 中，一部分是通过 R 的傳导电流 i_1 ，一部分是通过 C 和 r 的吸收电流 i_2 。其中只有傳导电流的大小，能够說明絕緣体絕緣电阻的高低。因此，要拿电表中所能讀得的总电流來說明絕緣体的絕緣电阻时，必須除去吸收电流的影响。怎样能除去吸收电流的影响呢？它的方法是加長試驗时通电的时间。因为，吸收电流的大小是随時間的長短而变化的，通电時間愈長，吸收电流愈小。因此，只要延長通电的时间，這項因素的影响就可减小。不过，电容量的大小和吸收电流减小的速度有关，电容量愈大，电流减小的速度愈慢，需要通电的时间就愈長。一般是以总电流 i 的数值达到稳定状态时，認為吸收电流的作用已經停止。这时，从仪表上讀到的总电流就可代表它的傳导电流。通过电压的換算后，就可得到絕緣电阻的数值。

高电阻測定法中，最常用的方法是搖表法。搖表的原理和接綫圖如圖 2 所示。圖中甲代表它根据欧姆表的原理而画出的工作圖，乙代表它內部的实际接綫圖。在圖 2 甲中， C 和 P 是

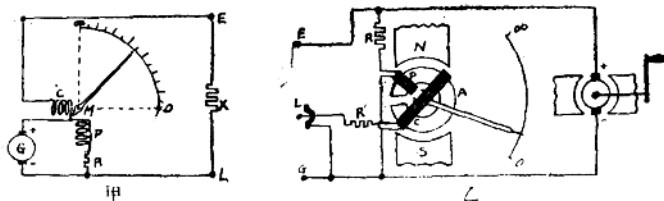


圖 2 搖表的原理和內部接線圖。

兩個互成直角的綫圈，固定在一起。當 C 和 P 綫圈內分別有電流通過時，就可與磁針 M 分別產生一個轉矩，使磁針轉動，在刻度上指示出讀數來。 G 代表直流電源，一般是 500 伏或 1000 伏。綫圈 P 和固定電阻 R 串聯後直接接在電源上。綫圈 C 必須和外部欲測電阻 X 連接，方能與電源接通。綫圈 P 中的電流只和電源電壓成正比，與欲測電阻無關。當電源電壓不變時，電流值也不變。綫圈 C 因和欲測電阻 X 串聯，所以，當電源電壓不變時， C 中的電流值是和 X 值的大小成反比。這樣，從電流的大小上可以測定電阻的數值。又因為由綫圈 P 所產生的磁場要使磁針 M 逆時鐘的方向旋轉；由綫圈 C 所產生的磁場要使磁針 M 順時鐘的方向旋轉；所以，當兩個力量平衡時，磁針就靜止在某一點上而度出數值來。比如，當欲測電阻 X 為無窮大時，綫圈 C 中無電流通過，指針軸平行於綫圈 P 的軸，指示的讀數為 ∞ 。如果 X 為零時，由綫圈 C 中所產生的轉矩，較綫圈 P 中所產生的轉矩大得多；這樣，指針軸就平行於綫圈 C 的軸，指示的讀數為 0。其他各項中間數值可以在預先校對好的刻度盤上得到。

圖 2 乙代表搖表內部的實際接線圖。它比甲圖中改進的地方是：1. 不用磁指針而用普通鉛指針。把指針固定在 P 和 C 兩個綫圈上，而 P 和 C 兩個綫圈能够在永久磁場 N 和 S 中自由轉

动，使指针指示出读数来。这样，可以避免用磁指针时，因磁针的衰老作用所引起的误差。2. 通过铁心 A 的作用，使磁场中磁力线密集在线圈 P 和 C 的周围，增加磁场的强度，避免周围其他磁场对它的影响。3. 在线圈 C 中也串联一个固定电阻 R' ，以阻止欲测电阻短路时可能引起的大电流，避免仪表的损坏。4. 在出线柱 L 端的周围加装一个金属护圈，连接在 G 端上，可以避免绝缘体表面泄漏电阻的影响。

在测定绝缘电阻时，先把绝缘体的表面揩拭干净，然后，把要测定的两端接在摇表的出线柱 L 和 E 上。慢慢摇动摇表手柄，等到指针读数稳定时，就可得到绝缘电阻的数值。如果要避免它的表面泄漏电阻的影响，那末，在它的表面加接一根引出线，接到摇表的 G 端。详细的试验方法，在本书第三章第七节中有专门的介绍，这里从略了。

二、中电阻测定法 使用中电阻测定法去测定电动机的直流电阻时，常用的方法有两种：1. 伏安表法；2. 直流电桥法。现在分述如下：

1. 伏安表法 这个方法是根据欧姆定律得来的，应用简单。在测定时，只要把欲测电阻 R 按照图 3 中所示的接法串联在线路内即可。图中：

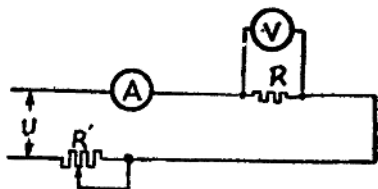


图 3 用伏安表测定电阻法。

A 是电流表。 V 是高电阻电压表（它自身的电阻值为 R_V ）。 R' 是可变电阻，用来调节线路电流的大小。 U 是直流电源。

假定电压表上读出的数值是 U_1 伏，电流表上读出的数值是 I_1 安。这时，所测的直流电阻的数值，可由下式求得：

$$R = \frac{U_1}{I_1} (\text{欧})。 \quad (1)$$

使用这个方法必须注意：1. 在选择仪表时，要使仪表度量的范围必须和测定的范围配合，不能太大或太小，否则，会得不到读数或有烧毁的可能；2. 测定时指针所指示的范围应当处在刻度盘中间 $2/3$ 的一段刻度上，因为仪表上刻度盘的二端，误差比较大；3. 必须考虑到所用电压表的自身电阻值，对所测电阻的影响。因为电压表和被测电阻并联，通过电流表的总电流，并不完全通过被测电阻。

为了校正电压表自身电阻值对测定结果的影响，可以用下面的公式计算被测电阻的大小。

假定 R_m 是仪表上读得的电阻值，也就是 R 和 R_V 并联后的总电阻值，那末， R_m 、 R 、 R_V 的关系如下：

$$\frac{1}{R_m} = \frac{1}{R} + \frac{1}{R_V}, \quad (2)$$

被测电阻值

$$R = \frac{R_V R_m}{R_V - R_m}。 \quad (3)$$

R_V 的数值在电压表的刻度盘上是有注明的。

由于测定时所采用的仪表的正确度有一定的范围，因此，用这个方法所得到的测定结果，它的正确性当然不会超出仪表本身正确度范围以外。比如，采用 1.0 级的仪表做试验时，测定结果的误差率可以有 1%。

2. 直流电桥法 在中电阻测定法中，这个方法实际上应用得最广。在测定时携带很方便，可以不用其他仪表的帮助，直接读出直流电阻的数值。正确性很高，一般的误差率可以在千分之一以下。它的接线图如图 4 所示。图中： P 和 Q 是两个已知的固定电阻，它的比值是可以调节的。 S 是标准可变电阻，

R 是被测电阻。 G 是达松式检流计。 U 是干电池。 N 是检流计的并联短路电阻。在仪表不使用时，应该把电阻 N 短路，以免仪表携带时，使检流计的指针摆动。在测定开始前，或电桥未达平衡时，也要把电阻 N 短路，以免过分大的电流通过检流计。 K_B 和 K_G 是两个电键，测定时应当先把 K_B 关闭，再把 K_G 关

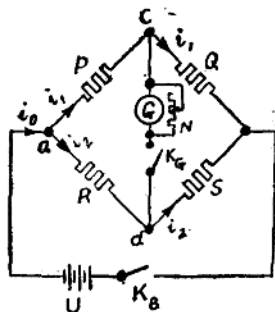


图4 直流电桥的接线图。

闭，以免因被测电阻的自感作用引起检流计指针过分大的偏转。

当逐渐调节标准电阻 S ，使检流计中的指针逐渐减小摆动，最后指在零点保持不变时，整个电桥达到了平衡状态。这时， c 、 d 两点间的电位差完全相等。通过电阻 P 的电流等于通过电阻 Q 的电流。同样，通过电阻 R 的电流等于通过电阻 S 的电流。假定 i_1 是通过电阻 P 和 Q 的电流， i_2 是通过电阻 R 和 S 的电流。那末，在平衡时，可以得到下列方程式：

$$i_1 P = i_2 R, \quad (4)$$

$$i_1 Q = i_2 S, \quad (5)$$

$$(4) \div (5) \text{ 得 } P/Q = R/S, \quad (6)$$

$$\text{或 } R = S \times P/Q. \quad (7)$$

P/Q 是直流电桥的比值臂，它的比值一般都取 10 的倍数，比如：0.01, 0.1, 1, 10, 100 等。 S 是标准可变电阻，有三个或四个旋盘。或者不用旋盘式改用插入式的，也很普通。

应用这种方法的唯一缺点是被测电阻两端的接触电阻，在测定时，也包括在线路电阻内。因此，在测定的结果中，除了电阻本身的数值外，还加上了接触点电阻的数值。幸而，在中

电阻测定中，电阻本身的数值一般都在1欧以上，表面清潔的接触点，它的接触电阻通常只在0.001欧左右，誤差率不大，可以略去不計。但是，在低电阻测定中，必須考虑到这个因素。

三、低电阻测定法 从直流电桥法的缺点中可以看出：中电阻测定法和低电阻测定法的不同点，不是在原理上的不同，而是由于接触电阻的影响，妨碍了低电阻测定法中結果的正确性。按照接触电阻的大小說，在接触良好的地方，大概是0.001欧左右。这个数值在中小型电动机的直流电阻值中，只有几千分之一的誤差，是不重要的。但是，在大型电动机的繞組中，它的直流电阻值有时只有0.01欧左右，如果把它也略去不計，誤差率就可达到十分之一。这时，無論使用任何正确的仪表，都会使測定的結果失去价值。

怎样能免除接触电阻的影响呢？它的方法是把被测电阻的兩端，分出四点：兩点是电流接綫端，兩点是电压接綫端。如圖5所示的是測定低电阻导体的接綫法，圖中： R 是被测的低电阻导体。 S 是标准电阻。

兩者都分出四个接綫端。 A_1A_2 是电流接綫端。 P_1P_2 是电压接綫端。 A_1A_2 和电源 U 串联成一个回路，电流在回路中流通，使 R 、 S 上产生电压降。而 P_1 和

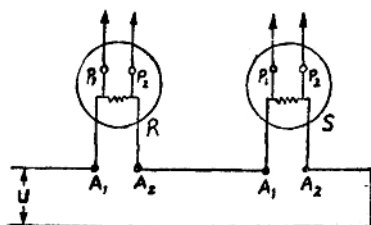


圖5 測定低电阻时的接綫法。

P_2 兩点所引出的电位差，只是 R 和 S 上的电压降。 A_1 和 A_2 上接触点的电压降，不能在 P_1 和 P_2 上得到。这样，只要把 R 和 S 上 P_1P_2 兩点間的电位差引出，作为直流电桥的兩臂，利用平

衡作用，从标准电阻 S 的读数上求得 R 的电阻值。

根据上述原理，可构成一种双重电桥，如图 6 所示的是双重电桥接线法。图中： X 是被测的低电阻。 S 是标准可变电阻。两者间用连接线 r 串联，接在电源 U 上，形成一个回路。 Q 、 M 、 q 、 m 是四个已知数值的电阻，做成电桥的四臂。其中一对是可变的，比如： M 和 m ，或 Q 和 q 。这样，又形成了一个回路。 G 是精密检流计，接在 c 、 d 两点间。在配备 Q 、 M 、 q 、 m 四个电阻时，使 Q/M 的比值等于 q/m 的比值。其他情形和直流电桥相同。

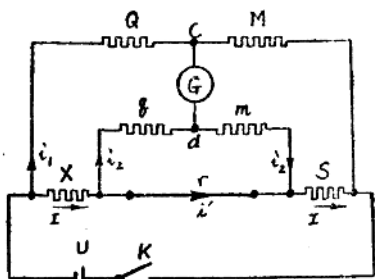


圖 6 双重电桥接线图。

当检流计的指针保持在零点不动时，整个线路达到平衡的状态，也就是 cd 两点间的电位差相同。这样，可以列式如下：

$$i_1 Q = I X + i_2 q, \quad (8)$$

$$i_1 M = I S + i_2 m. \quad (9)$$

由于电阻 q 、 m 、 r 自成回路，若把通过 X 和 S 中的电流 I ，通过 q 和 m 中的电流 i_2 和通过 r 中的电流 i' 互相替代，可以列式如下：

$$i' r = i_2 (q + m), \quad (10)$$

$$i' = I - i_2, \quad (11)$$

$$(I - i_2) r = i_2 (q + m), \quad (12)$$

$$i_2 (r + q + m) = I r, \quad (13)$$

因此,
$$i_2 = \frac{r}{r+q+m} \times I. \quad (14)$$

把 (14) 式代入 (8), (9) 兩式中, 得:

$$i_1 Q = IX + \frac{rq}{r+q+m} I, \quad (15)$$

$$i_1 M = IS + \frac{rm}{r+q+m} I, \quad (16)$$

(15) ÷ (16)
$$\frac{Q}{M} = \frac{X(r+q+m)+rq}{S(r+q+m)+rm}, \quad (17)$$

即
$$XM = QS + \frac{r(mQ-qM)}{r+q+m} \quad (18)$$

或
$$X = \frac{QS}{M} + \frac{r(mQ-qM)}{M(r+q+m)}. \quad (19)$$

因为,
$$Q/M = q/m,$$

所以,
$$mQ - qM = 0.$$

(19) 式可以簡化为:

$$\underline{\underline{X = Q/M \times S_0}} \quad (20)$$

$\frac{Q}{M}$ 是双重电桥的比值臂, 像直流电桥中的比值臂一样。这种电桥的正确性是很高的, 一般誤差率只有千分之一左右。

2 轉速的測定

測定感应电动机轉速的方法, 最常用的, 有下面四种:

一、轉速表法 如圖 7 所示的是轉速表的外觀。圖中: 1 是橡皮尖端; 2 是測速定位; 3 是指針; 4 是刻度盤。当測定轉速时, 把轉速表的橡皮尖端, 按照圖 8 所示的方法, 插入电动机轉軸的中心, 并且保持轉速表在水平位置, 使表的中心綫

和轉軸的中心綫在同一直綫上。这样，当电动机的轉軸旋轉时，轉速表上的指針就能跟着偏轉，指示出数值来。使用这个方法时，必須注意：1. 当橡皮尖端插入轉軸时，用力不可太猛，以免损坏；也不要使接触太松，以免在其間产生摩擦；2. 在轉速表的定位上，一般有三个范围，在測定时，定位应当放在最大值，見指針轉动不大时，再逐渐放低定位，以免损坏轉速表；3. 刻度盤上指針所指的地方，有几种数值，究竟采用哪个数值，必須看表上定位的范围后，方能決定。

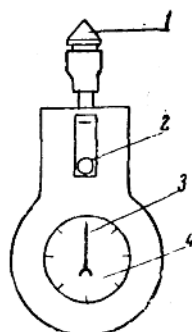


圖7 轉速表的外觀。

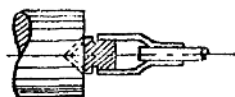


圖8 轉速表插入轉軸的位置。

轉速表的工作原理是利用表軸轉动时所产生的离心力的作用，由它帶動指針，指示出数值来。轉速表不能直接記錄轉軸的旋轉数，它必須通过离心力的換算，得出轉速的数值。因此是間接的測速法，正确性也不够高的。

二、測速表法 測速表的外觀和轉速表非常相似，使用的方法也是相同的。但是，当測速表的橡皮尖端插入轉軸后，表上的指針是不立刻轉动的，必須另外捺下控制柱后，指針方始轉动。稍过片刻，指針又停止不动。这时，它所指出的数值就是当时的轉速。

为什么它的作用是这样的呢？这是因为測速表上指針的轉动，不是靠表軸的离心力，而是直接記錄表軸在一定時間內的旋轉数的关系。因此，在工作原理上，它和轉速表完全不同。在这个表中有兩個主要部分：一个是計数部分，用来記錄表軸的

旋轉數。一个是控制時間部分，使表軸在一定的時間內和指針接觸，超过这一時間后，能够自动和指針脱离。即使表軸还没有停止旋轉，指針的指示值已不受影响。这个一定時間的限止，通常只有三秒鐘，它是把三秒鐘內的旋轉數，代表一分鐘內的旋轉數，用公式表示如下：

$$N = \frac{60n}{t},$$

式中 N ——一分鐘內的轉數；

n —— t 秒鐘內的轉數。

測速表上指針所指的数值既然是直接計数的結果，正确性自然較高。但是，缺点还是有的，它是把瞬時值代表平均值，在感应电动机的轉速变化不定时，誤差率就大。

三、差頻測速法 差頻測速法的原理是利用光源上所發出的固定頻率，和电动机轉軸上所發出的变化頻率互相交頻，产生頻差，从頻差的計算上求出轉差来。

頻率和轉速有怎样的关系呢？在發電机上，我們知道轉速和頻率有如下的关系：

$$N = \frac{60f}{P}, \quad (22)$$

式中 N ——發電机每分鐘的轉數；

P ——發電机上磁極的对数；

f ——發電机每秒鐘的赫芝数。

这种关系，在感应电动机中同样可以适用。这时， N 是感应电动机的同期轉速， P 是定子繞組中磁極的对数，而 f 是外加电源的頻率。

頻差产生的方法，可以举例說明。例如，有一个光源是荧光灯（俗称日光灯）。荧光灯是利用陰極电子的放射，使电子和荧光質冲击而發光的。因此，灯光閃动的頻率是和外加电源的

頻率完全相同。此外有一只電扇，它的葉片每分鐘閃動的次數，等於轉速和葉數的乘積。當它們單獨的發生作用時，人的眼睛是無法辨清楚燈光和葉片的閃動的。但是，當熒光燈和電扇逐漸接近時，電扇葉片轉動的影子就能隱約看到。這是由於熒光燈閃動的頻率和電扇葉片轉動的頻率發生了頻差，而且，這個頻差的頻率較低，能夠被人的眼睛感覺出來。當二者中一個是已知數時，那末，頻差知道後，其他一個未知數就可以求出，這就是差頻測速法的道理。

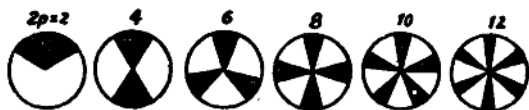


圖 9 差頻測速法中用的圖案片。

同樣的方法，可以應用在電動機上。把電動機的轉軸當做電扇的轉軸，在電動機的轉軸上貼一張白紙做的圓片，圓片上畫如圖 9 所示的圖案。假如感應電動機是兩極，可以畫一個黑色扇形；假如是四極，畫兩個扇形；六極，畫三個扇形，余类推。在都市中，發電廠的電源頻率是不允許變化的，因此，把熒光燈當做固定頻率的來源是可靠的。當測定電動機的轉速時，把熒光燈照在旋轉轉軸的圖案上，就可以看見黑色扇形慢慢地移動。把一分鐘內通過空間定點上的扇形次數，被除以磁極的對數後，就可得到轉差數。舉例說明如下：

假定熒光燈和感應電動機使用同一電源，它的頻率是每秒 50 赫芝。那末，感應電動機的同步轉速可由公式 (22) 求得如下：

$$P = 1 \text{ (二極)} \quad N = 3000 \text{ 轉/分};$$

$$P = 2 \text{ (四極)} \quad N = 1500 \text{ 轉/分};$$