

介質損失角的測量

郎 东 旭編著

水利电力出版社

內 容 提 要

書中對介質損失角的意義和測量方法、測量用儀器以及影響介質損失角的有關因素等均作了系統地敘述，對測量結果的判斷方法也作了必要的說明。

本書可供電力系統和工業企業中的絕緣試驗工人參考。



介質損失角的測量

郎 东 旭編著

*

2016D579

水利電力出版社出版（北京西郊科學路二里內）

北京市書刊出版業營業許可證出字第105號

水利電力出版社印刷廠排印 新華書店發行

*

787×1092 $\frac{1}{32}$ 開本*2 $\frac{5}{16}$ 印張*52千字

1959年4月北京第1版

1959年4月北京第1次印刷(0001—3,070冊)

統一書號：T15143·364 定價(第9類)0.26元

序 言

一切帶絕緣的电气設備在运行中由于受到温度，湿度，長時間負荷的作用及操作过电压和大气过电压的襲击等等的影響，其絕緣水平逐漸降低，甚至招致絕緣損坏造成絕緣事故。

为了寻求簡便的檢查方法，有效地找出設備在运行中存在的絕緣缺陷，以便及早处理保證設備的可靠运行，因此在預防性試驗中对某些主要电气設備进行介質損失角測量具有重大的意义。它可以正确地发现設備絕緣在运行中的潮湿和劣化程度，从而作到了設備在运行中的監督。同时通过損失角的測量，指出缺陷位置，也起到了以試驗指導檢修的作用，充分发挥了試驗工作以預防为主的目的。

为了帮助从事絕緣試驗的工作人員更好地掌握介質損失角的測量技术，本書对介質損失角的意义和測量方法及測量用仪器以及影响介質損失角的有关因素等均作了系統地敘述，并对測量結果的判断方法也作了必要的說明。

由于本人水平的限制和写作时间太仓促，无疑地，書中敘述的一些問題是不够完善的。錯誤遺漏之处亦所难免，尚希讀者同志随时提出指正和批評。

郎东旭

1957年7月

目 录

第一章 一般概念.....	3
第一节 什么叫介質損失角.....	3
第二节 介質損失角与有关因素的关系.....	5
第三节 測量介質損失角的基本概念.....	9
第二章 測量介質損失角的設備.....	9
第一节 M型介質試驗器.....	9
第二节 苏联MII-16型西林电桥.....	17
第三节 苏联MII型西林电桥.....	27
第四节 德国MF8制A500型西林电桥.....	32
第五节 低力率瓦特表.....	38
第三章 与測量介質損失角有关的因素.....	39
第一节 溫度.....	39
第二节 电压.....	40
第三节 外界干扰.....	41
第四章 各种电气設備測量介質損失角的方法.....	42
第一节 发电机介質損失角的測量.....	42
第二节 变压器介質損失角的測量.....	44
第三节 油开关介質損失角的測量.....	46
第四节 电纜介質損失角的測量.....	49
第五节 套管介質損失角的測量.....	51
第六节 互感器.....	55
第七节 絕緣油測法及設備.....	56
第八节 絕緣材料介質損失角的測量.....	59
第五章 試驗結果的判斷.....	63
第一节 判斷絕緣程度的基本要求.....	63
第二节 測得介質損失角怎样进行比较.....	64
第三节 怎样作結論.....	66
第六章 各种电气設備的介質損失角参考規格.....	69
第一节 发电机.....	70
第二节 变压器.....	70
第三节 油开关.....	71
第四节 电纜.....	71
第五节 套管.....	73
第六节 絕緣油.....	73
第七节 組合电容器及保护电容器.....	74
第八节 电力电容器.....	74

第一章 一般概念

第一节 什么叫介質損失角

談到介質損失角之前，我們应当首先要知道什么叫介質？簡單地說介質就是阻止電流通過的絕緣材料。一切電氣設備的結構都不可缺少絕緣材料。就拿變壓器來說，綫卷是用銅導綫繞制成的，一圈和另一圈必需用絕緣材料隔離開，不讓電流通過，假如電流從這裡通過的話，就會使綫卷造成短路。這樣必將招致綫卷燒壞。

當然，變壓器綫卷對地也要有足夠的絕緣，不然的話也不能算是一個完整可靠的變壓器。但是我們必須知道，在電氣設備的製造工業中，儘管採用最好的絕緣材料，也不可能完全做到一點電流都不流過絕緣材料，多少總會有點電流通過絕緣材料的。所以電氣設備的製造必須保證電流按規定的電路流通，盡量把流入絕緣材料中的電流限制到最小限度。

為什麼要這樣嚴格地要求呢？如果我們知道了在絕緣材料中的電流會產生那些後果，就可以明白了。當絕緣材料在交流電壓作用下，有電流通過時，由於絕緣材料的結構不同，會產生不同程度的電能損失，一般叫作介質損失。

介質損失是絕緣材料的一種性質，為了用介質損失來表示絕緣材料的良好程度，首先假定一個理想的電容器，當它在交流電壓作用下，若沒有電能損失的話，則加壓所形成的充電電流要比電壓超前 90° ，如果有電能損失時，則當電壓加上後通過的充電電流可用下面的等值回路來代替，此時通過絕緣材料的

电流包含着电导电流和充电电流，由于电导电流比充电电流小得多，为说明简单起见我们用图 1 乙所示的化简的向量图来解释。从图中可以显明地看出，当介质内有电能损失时，充电电流将小于 90° ，于是在交流电压作用下的介质损失的功率为：

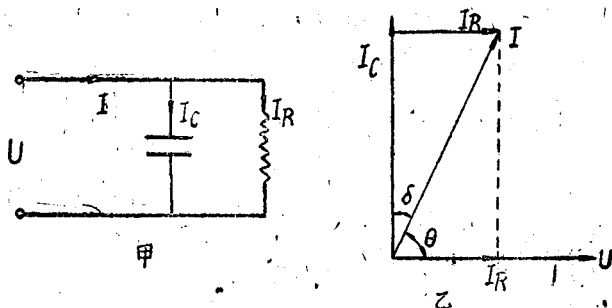


图 1 代表介质的等值回路

$$P = UI = UI \cos \theta.$$

由于 $\cos \theta = \frac{\operatorname{tg} \delta}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \delta}}$ ，当 δ 很小时 $\operatorname{tg} \delta$ 可用 $\cos \theta$ 来代替，

即 $\cos \theta \approx \operatorname{tg} \delta$ 。若总的电容电流 I_c 用物理电容 C 来表示，则 $I_c = \omega CU$ ，于是介质损失的功率可写成下式：

$$P = UI \operatorname{tg} \delta = \omega CU^2 \operatorname{tg} \delta.$$

从上式的关系式不难看出，介质损失和 $\operatorname{tg} \delta$ 成正比，为了表示绝缘材料的优劣，一般介质损失的大小常以介质损失角 $\operatorname{tg} \delta$ 来代表，它能反映绝缘的特性；介质损失愈大， $\operatorname{tg} \delta$ 也愈大。一般情况下 I_c 比 I_R 大得多，至于 $\operatorname{tg} \delta$ 的变化，可用下式表示：

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{I_R}{I_c}.$$

由于所加电压 U 不变，故 I_R 的大小和介质损失的大小成

正比，而 I_c 的大小則正比于电容或介質常数。

第二节 介質損失角与有关因素的关系

1. 温度对介質損失角的影响

电气设备的运行温度对介質損失角的測量值是有很大影响的，因为介質的电导是随温度而改变的，当温度升高时，交流电压作用在介質上，漏泄电流也会增高，故电导愈大，損失角必然会显著增大。

但是，各种电气设备的絕緣結構是不同的，它們的劣化程度也不一样，損失角与温度的变化关系也很复杂，所以介質損失角的測量最好能在同一温度下进行或根据各种不同温度測得的損失角进行判断。依靠換算到规定的温度下作为判断的标准是不够准确的，因为換算公式的計算值不能精确地表示出絕緣材料特性的真实情况。为了便于比較判断，各国的資料中均规定了測量損失角时的标准温度为 20°C 。

当然，所有电气设备在运行中都要求在 20°C 进行測量是有困难的，如果我们能积累更丰富的运行經驗，根据不同温度所測得的 $\text{tg}\delta$ 进行比較判断还是可靠的。

几年来，我国各电力系统中的預防性絕緣試驗工作除了按不同温度下測得的 $\text{tg}\delta$ 进行比較判断外，同时还采用了表 1 所載換算系数換算到 20°C 时的 $\text{tg}\delta$ 值作为分析判断的参考。

計算式：

$$\text{tg}\delta_{20^{\circ}\text{C}}(\%) = \text{tg}\delta_{t^{\circ}\text{C}}(\%) \times \text{温度系数}$$

实际运行經驗表明，采用表 1 的温度換算系数，还是可以的。但必須指出，只能作为参考，而比較好的办法是在运行温度下測得損失角值进行判断。

表 1

温度换算系数表

試驗溫度 (°C)	油浸式電力 變壓器及絕緣油	充油互感器	套		管	
			電容型	充油型	充混合	絕緣 物型
0	1.56	1.67	1.22	1.18	1.26	
1	1.54	1.64	1.21	1.17	1.25	
2	1.52	1.61	1.20	1.16	1.24	
3	1.50	1.58	1.19	1.15	1.22	
4	1.48	1.55	1.17	1.15	1.21	
5	1.46	1.52	1.16	1.14	1.20	
6	1.45	1.49	1.15	1.13	1.19	
7	1.44	1.46	1.14	1.12	1.17	
8	1.43	1.43	1.13	1.11	1.16	
9	1.41	1.40	1.11	1.11	1.15	
10	1.38	1.36	1.10	1.10	1.14	
11	1.35	1.33	1.09	1.09	1.12	
12	1.31	1.30	1.08	1.08	1.11	
13	1.27	1.27	1.07	1.07	1.10	
14	1.24	1.23	1.06	1.06	1.08	
15	1.20	1.19	1.05	1.05	1.07	
16	1.16	1.16	1.04	1.04	1.06	
17	1.12	1.12	1.03	1.03	1.04	
18	1.08	1.08	1.02	1.02	1.03	
19	1.04	1.04	1.01	1.01	1.01	
20	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	
21	0.96	0.97	0.99	0.99	0.98	
22	0.91	0.93	0.98	0.97	0.97	
23	0.87	0.90	0.96	0.96	0.95	
24	0.83	0.86	0.95	0.94	0.93	
25	0.79	0.83	0.94	0.93	0.92	
26	0.76	0.80	0.93	0.91	0.90	
27	0.73	0.77	0.92	0.90	0.89	
28	0.70	0.74	0.91	0.88	0.87	

續表

試驗溫度 (°C)	油浸式電力 變壓器及絕緣油	充油互感器	套		管
			電容型	充油型	充填絕緣 混合物型
29	0.67	0.71	0.90	0.87	0.86
30	0.63	0.69	0.88	0.86	0.84
31	0.60	0.67	0.87	0.84	0.83
32	0.58	0.65	0.86	0.83	0.81
33	0.56	0.62	0.85	0.81	0.79
34	0.53	0.60	0.83	0.80	0.77
35	0.51	0.58	0.82	0.78	0.76
36	0.49	0.56	0.81	0.77	0.74
37	0.47	0.54	0.79	0.75	0.72
38	0.45	0.52	0.78	0.74	0.70
39	0.44	0.50	0.76	0.72	0.68
40	0.42	0.48	0.75	0.70	0.67
41	0.40	0.47	0.73	0.68	0.65
42	0.38	0.45	0.72	0.67	0.63
43	0.37	0.44	0.70	0.65	0.61
44	0.36	0.42	0.69	0.63	0.60
45	0.34	0.41	0.67	0.62	0.58
46	0.33		0.66	0.61	0.56
47	0.31		0.64	0.60	0.55
48	0.30		0.63	0.58	0.53
49	0.29		0.61	0.57	0.52
50	0.28		0.60	0.56	0.50
52	0.26		0.57	0.53	0.47
54	0.23		0.54	0.51	0.44
56	0.21		0.51	0.49	0.41
58	0.19		0.48	0.46	0.38
60	0.17		0.45	0.44	0.36
62	0.16		0.42	0.42	0.33
64	0.15		0.39	0.40	0.31

續表

試驗溫度 (°C)	油浸式電力 變壓器及絕緣油	充油互感器	套 管		
			電容型	充油型	充填絕緣 混合物型
66	0.14		0.37	0.39	0.28
68	0.13		0.35	0.37	0.26
70	0.12		0.32	0.36	0.23
72	0.12		0.30	0.34	0.21
74	0.11		0.28	0.33	0.19
76	0.10		0.27	0.31	0.17
78	0.09		0.26	0.30	0.16
80	0.09		0.25	0.29	0.15

2. 損失角與升加電壓的關係

一般在電壓較低的情況下進行介質損失角的測量時，看不出介質損失角與電壓有什麼關係，但是試驗電壓提高時，便會發現 $\text{tg}\delta$ 值有顯著增加的情況，如圖 2 所示。

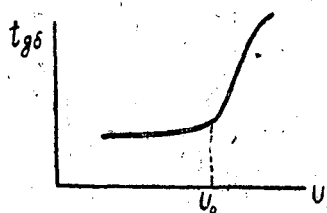


圖 2 損失角與升加電壓的關係

當介質中的空氣隙在電壓作用下產生游離時，則介質損失角就將急劇增加，如圖 2 中的 U_0 點即為開始游離時的臨界電壓，它跟氣體的壓力有很大關係，因為分子的撞擊游離的發展過程與氣體質點的自由途徑的長度有

關。如果以 $P_u = U^2 \omega C \text{tg}\delta$ 表示其游離損失，並與 $P_u = A f (U - U_0)^2$ 相比較，可知 $\text{tg}\delta$ 值在電壓增加時也應該增加。

損失角隨電壓升高而增加的關係曲線，通常叫作游離曲線。

第三节 測量介質損失角的基本概念

一般絕緣良好的电气設備，它的介質損失角是很小的，但是由于設備在長期地運行中受各方面條件的影響，絕緣會慢慢劣化的，如絕緣產生了局部弱點或是嚴重的受潮，這樣將使介質損失角值顯著的增大。至于影響損失角值增大的原因，對各種不同电气設備來說，其表現形態也有所不同，除了設備的內部絕緣在運行中長期受高溫的作用、電場的作用，機械的振動，系統短路故障的影響等之外。外界條件的影響也是很重要的。譬如暴露于空氣中的情況，周圍空氣溫度、濕度，設備的密閉情況和脏污情況等。這樣長久繼續下去，絕緣必將逐漸劣化、變脆、龜裂受潮等。毫無疑問，介質損失角將隨之增大。

為了尋求簡便的試驗方法，在近几十年来各國廣泛地採用了非破壞性絕緣試驗——以測量电气設備的介質損失角作為監視運行中电气設備絕緣變化的主要方法。從而有效地找出了設備絕緣存在的缺陷。假如這方法能和其他非破壞性絕緣試驗方法配合起來，這就更容易發現絕緣缺陷。

第二章 測量介質損失角的設備

第一节 M型介質試驗器

1. 基本原理

在我國各電力系統中廣泛採用的2,500伏M型介質試驗器系根據美國西屋公司出品的M型介質試驗器仿制的，其基本原理如圖3所示。它是由電源綫路、操作綫路、量度綫路和真空

管电压表等线路构成的不平衡电桥，回路的最大允许电流为20毫安，测量范围可达50,000千分伏安。

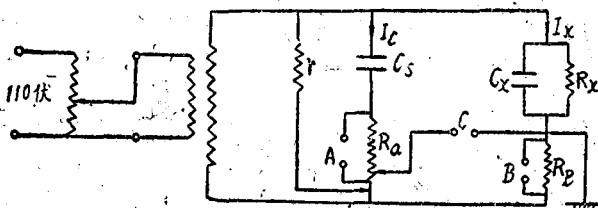


图3 M型介質試驗器基本原理图

C_s —标准电容器，255~260微微法； R_a —可变电阻； R_x —固定电阻。

試驗時可从仪表的指示直接讀出千分伏安和千分瓦，根据这个数值求出介質損失角：

$$\operatorname{tg} \delta(\%) = \frac{\text{千分瓦}}{\text{千分伏安}} \times 100\%.$$

测量的基本方法是將 2,500 伏交流电压加于被試设备后，通过的电流 I_x 在电阻 R_B 上产生的电压降 $I_x R_B$ ，在 B 点以真空管电压表量出的电压，在电表上直接讀出千分伏安。千分瓦的量度可依被試设备的总电流 I_x 中有效部分 I_{xR} 、无效部分 I_{xc} 、通过电容器 C_s 的电流 I_{sc} ，它們在电阻 R_a 、 R_B 上分别产生和本身同相的电压降 $I_{xR} R_B$ 、 $I_{xc} R_B$ 和 $I_{sc} R_a$ （其中 $I_{xc} R_B$ 和 $I_{sc} R_a$ 同相）来决定。假如以真空管电压表量 A 点的电压降，并将 R_a 右侧的分头逐渐向上滑动，使 $I_{sc} R_a$ 中取出一部分电压恰与 $I_{xc} R_B$ 抵消，则 C 点电压差只剩 $I_{xR} R_B$ ，此时电表的指示最小，該值即为所测量的千分瓦。

在强电场附近进行試驗时，常因外部电场的干扰而使测量发生誤差，甚至会使試驗完全失望。在一般情况下，本介質試驗器可以消除干扰电流。其具体方法用图 4 的向量图来说明。

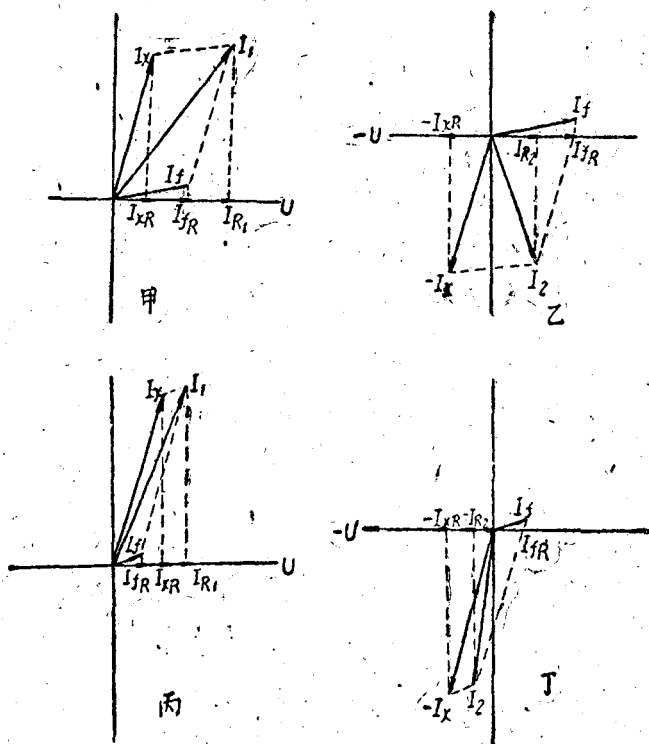


图4 干扰电流的消除

我們假定干扰电流为 I_f ，实际的試驗电流为 I_x ，合成电流为 I_1 ，各电流的有效部分分别为 I_{fR} ， I_{xR} ， I_{R1} ，所量得的千分瓦(mW_1)将为 I_{R1} 在 R_B 上的电压降，即

$$mW_1 = I_{R1} \times R_B = (I_{fR} + I_{xR}) \times R_B.$$

如果把电源电压 U 反相后，则 I_x 即顛倒 180° 变为 $-I_x$ 。但是此时外部干扰电流 I_f 仍然不变，故所測得的千分瓦(mW_2) 将为 I_{R2} 在 R_B 上的电压降，即

$$mW_2 = I_{R_2} \times R_B = (I_{fR} - I_{xR}) \times R_B.$$

实际千分瓦的数值应为 I_{xR} 在 R_B 上的电压降, 由上述两式可求得千分瓦(mW):

$$mW = I_{xR} \times R_B = \frac{I_{R_1} - I_{R_2}}{2} \times R_B = \frac{mW_1 - mW_2}{2}.$$

这是当干扰电流的有效部分 I_{fR} 大于实际试验电流的有效部分 I_{xR} 的情况下的公式。如干扰电流 I_{fR} 小于试验电流的有效部分 I_{xR} 时, 则反相后 I_{x_2} 便改变为第三象限内, 于是可求得:

$$mW_1 = I_{R_1} \times R_B = (I_{xR} + I_{fR}) \times R_B,$$

$$mW_2 = I_{R_2} \times R_B = (I_{xR} + I_{fR}) \times R_B.$$

$$\text{所以 } mW = I_{xR} \times R_B = \frac{mW_1 + mW_2}{2}.$$

实际进行测量时, 为了能够区别上述情况, 在制造时特在 2,500 伏高电压线路中跨接一个 50 兆欧的高电阻(如图 3 中的 r), 以引入一部分同相电流。将电阻 R_a 左侧分头逐渐向上滑动, 则 R_a 上的电压降由超前 90° 逐渐小于 90° , 其影响相当于试验电流的有效部分的数值的增加, 在图 4 所示的甲及丙、丁的情况下, I_{R_1}, I_{R_2} 将随 I_{xR} 的增加而增大。在图 4 的乙中 I_{R_2} 则随 I_{xR} 增加而减少。由此可知在电源电压反相前后, 将 R_a 滑点向上滑动, 电表的读数都加大或减小, 则将两读数相加被 2 除, 即得出实际的千分瓦(mW)数值。如果两次读数一个加大一个减小, 即将两读数相减被 2 除之, 其值即为实际的千分瓦(mW)数值。

当被试设备的 $\text{tg}\delta$ 在 15% 以下时, 可根据下述计算公式算出被试设备的电容(试验电源为 50 周时)。

$$C_a = mVA \times 0.51 \text{ 微微法。}$$

2. 操作方法

(1) 試驗之前应先用电压表测量电源电压是否为 110 伏，是否一极对地有 110 伏。

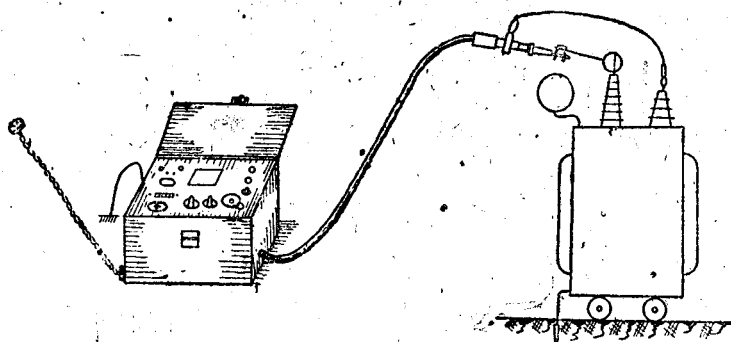


图 5 M 型介質試驗器的接綫图

(2) 用接地綫把試驗器的外皮接地，試驗電綫的插头插入鉄箱右方的電綫插座內，電綫鈎接到被試設備上。

(3) 合上电源开关，此时綠灯应亮，当放大器灯絲燒热后，电表指針即行摆动，約30秒后电表指針即回到零位。然后才能开始操作。

(4) 按下按钮开关，接地繼电器即閉合。此时綠灯熄灭紅灯亮，若紅灯不亮时应把电源倒換一下极性，紅灯亮后，慢慢升加电压至2,500伏。随时注視 $mVA-mW$ 指示数值，并調整电表的指示为 100，如达不到 100 时，应調整右上方的“調整”把手，使其指示 100。

(5) 将倍率選擇开关扭至高倍率范围 500 处，若测量的刻度讀数超过 100 时，說明被試設備已超过本試驗器的测量范围，不能进行試驗。若此时讀数在 10 或 10 以下时，可将倍率选

擇开关扭到低倍率范围进行测量，記下此讀数，其值即为被試设备的 mVA ，此时应扳反相关于另一側，若讀数有不同的情况，則应記錄其平均值。

(6) 記錄 mVA 后，慢慢調整千分瓦調整器，使电表指示为最小，陆續降低倍率范围，調整电表指示为最小的数值，直至不能調整时为止，此时記錄的讀数即为 mW 数。

(7) 全部試驗完毕，应将电压降至零、断开电源开关，此时紅灯熄灭，将开关，千分瓦調整器及倍率選擇开关等都恢复原位。

(8) 最后根据測得的千分伏安和千分瓦計算出被試设备的介質損失角。

3. 檢 修 維 护

M 型介質試驗器在使用期間必須保持清潔干燥，因此应經常进行清扫內部的灰尘，不能把試驗器放置在潮湿的地方，以免受潮。試驗器在运往現場的途中，应不使其受劇烈的机械振動，以免損坏电表、真空管及其他零件。

M 型介質試驗器在使用期間，为保持高度的准确性，对各部分（倍率器、无感电阻、并聯电阻、真空管电压表、放大器及輸出高压等）应作定期的校驗。当发现任何部分不符合要求时，即应进行彻底的檢查和修理。

为了使每个操作 M 型介質試驗器的人員能够熟悉和掌握試驗器的一些特点，今对一般容易发生的毛病及其檢查和判断方法略述如下，以供参考。

(1) 綠色指示灯不亮 当接通 110 伏电源后，綠灯应亮。如果不亮可能是灯泡的灯絲燒断或灯座松弛，及保險絲已断。可以用电压表測量插座的电压，以判断故障原因。

如果电源插上綠灯不亮，但按上按钮开关繼电器可以閉合，而紅灯不亮，且无調整电压，这种現象为不接繼电器的一綫的保險絲已断。

(2)紅色指示灯不亮 若綠灯已亮，繼电器已閉合，則紅灯应亮，否則需檢查繼电器的接点。若試驗器能进行工作，而紅灯不亮，则表示灯泡与灯座松动或灯絲燒断。

(3)保險絲燒断 如果电源电压正常，当插上电源后保險絲立即燒断，說明接繼电器的一綫在試驗器內有直接接地的地方。

(4)繼电器不閉合 繼电器的动作綫圈一端接于电源綫上，另一端經按钮开关接地，所以繼电器的动作必須具备下列条件：1)試驗器本身必須接地，2)电源电压一端与地需在90伏以上；3)电源插头的极性必須插对；4)按钮开关必須合上。

(5)电压上升不稳定 炭刷与綫卷的接触不好，可将試驗器的盖子打开，将自耦变压器的滑动炭刷修理好并固定住。

(6)高压开关跳閘 当升压时高压开关跳閘，表示被試回路高压綫对地或对遮蔽保护間发生过負荷，可将高压電纜鉤脫离被試設備懸空放置，再升加电压，若仍跳閘，可能電纜絕緣已經击穿，再把電纜綫拆除，重新升加电压，如果仍然跳閘即說明变压器的高压側或低压側有短路現象。

(7)无試驗电压 如升压时电压已調整到全电压的一半，这时电表的指示还很小，說明在被試回路有短路的現象，若電纜綫拆除后，电表指示仍很小，则表示电源电压过低，电压調整器或开关有接触不良的地方。

試驗时，如将反相开关投向另一側，电表无指示的話表示反相开关不良。若倍率調整器在“調整”位置时，升加电压电表指示升起，而电压表无指示，可能电压表已断綫或损坏。电表