



中华人民共和国国家标准

GB/T 1311—2024

代替 GB/T 1311—2008

直流电机试验方法

Test methods for direct current machines

2024-08-23 发布

2025-03-01 实施

国家市场监督管理总局
国家标准化管理委员会 发布

目 次

前言	III
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	1
4 符号	2
5 基本要求	3
6 绕组对机壳及绕组相互间绝缘电阻的测定	7
7 绕组在实际冷态下电阻的测定	8
8 轴电压的测定	10
9 电感的测定	11
10 空载试验	14
11 整流电源供电时电机的电压、电流纹波因数及电流波形因数的测定	15
12 额定负载试验	17
13 热试验	18
14 效率的测定	24
15 调整试验	34
16 转动惯量的测定	36
17 无火花换向区域的测定	39
18 电枢电流变化率的测定	41
19 并(他)励磁调整曲线	43
20 (空载和负载)磁饱和曲线	43
21 其他试验	44
附录 A (规范性) 输入电流及输入功率的修正	48
附录 B (规范性) 转矩读数的修正	50
附录 C (资料性) 换向火花等级判定	51
附录 D (规范性) 由测功机试验确定负载杂散损耗的直流分量	52
附录 E (规范性) 直流电机的短路方法	54
参考文献	57
图 1 转矩测量	4
图 2 感应法测定中性线试验线路图	5
图 3 作图法测定中性线	6
图 4 电压表-电流表法原理接线图	9
图 5 轴电压测定示意图	11

图 6	负载状态下的饱和电枢回路电感测定	12
图 7	测量饱和并(他)励磁绕组电感的试验线路	13
图 8	励磁绕组电感测定	13
图 9	不间断电压、电流波形	16
图 10	间断式电压、电流波形	17
图 11	损耗由线路电源或升压机单独供给的回馈法试验原理	22
图 12	损耗由线路电源和升压机联合供给的回馈法试验原理	22
图 13	直接测量输入输出法试验原理图	25
图 14	风摩耗和铁耗的确定	29
图 15	直流电机单电源对拖试验确定负载杂散损耗的直流分量	30
图 16	整流电源供电时确定负载杂散损耗的交流分量	31
图 17	直流电机单电源对拖试验原理图	34
图 18	空载自减速曲线	36
图 19	双钢丝扭摆法确定转动惯量	38
图 20	无火花换向区域试验线路	39
图 21	辅助发电机用以增大或减小电枢电流	40
图 22	特定恒转速无火花换向区域	40
图 23	确定电枢电流变化率的试验线路	41
图 24	电枢电流瞬态变化	42
图 A.1	永磁电动机、串励电动机及他励电动机测量线路	48
图 A.2	并励电动机及复励电动机测量线路	48
图 A.3	整流电源供电进行试验时的测量线路	49
图 E.1	感应法检查串励绕组的极性	54
图 E.2	反向接入串励绕组的短路方法	54
图 E.3	用功率扩大机控制励磁的短路方法	55
图 E.4	用复励直流发电机控制励磁的短路方法	55
图 E.5	临时缠绕串励绕组的短路方法	55
图 E.6	将一半主极绕组反接的短路方法	56
表 1	绝缘结构热分级对应的基准温度	7
表 2	绝缘电阻表的选择	8
表 3	蛙绕组的电阻系数	10
表 4	时间间隔	21
表 5	效率试验方法	25
表 6	不同转速比的校正系数	32
表 7	最少检查试验项目	44
表 C.1	换向火花等级判定	51
表 D.1	负载杂散损耗计算表	53

前 言

本文件按照 GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第 1 部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

本文件代替 GB/T 1311—2008《直流电机试验方法》，与 GB/T 1311—2008 相比，除结构调整和编辑性改动外，主要技术变化如下：

- a) 增加了术语和定义、符号(见第 3 章、第 4 章)；
- b) 更改了对测试仪器准确度的要求(见 5.2, 2008 年版的 3.2)；
- c) 增加了绕组电阻及温度的确定方法(见 5.4)；
- d) 增加了试验条件的要求(见 5.5)；
- e) 更改了绝缘电阻表直流测量电压的选择范围(见 6.2, 2008 年版的 4.2)；
- f) 更改了空载试验电压取点及最高试验电压(见第 10 章, 2008 年版的第 8 章)；
- g) 更改了确定效率的试验方法, 划分为“2-1-3A、2-1-3B、2-1-3C、2-1-3D 和 2-1-3E”5 种方法(见第 14 章, 2008 年版的第 12 章)；
- h) 增加了由测功机试验确定 P_{LL} 直流分量的试验方法(见 14.4.3.3)；
- i) 增加了确定发电机和原动机组合的电压调整率的试验方法(见 15.3)；
- j) 增加了并(他)励磁调整曲线试验的要求(见第 19 章)；
- k) 增加了空载和负载磁饱和曲线试验的要求(见第 20 章)。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由中国电器工业协会提出。

本文件由全国旋转电机标准化技术委员会(SAC/TC 26)归口。

本文件起草单位：上海电机系统节能工程技术研究中心有限公司、江苏微特利电机股份有限公司、仁亿电器股份有限公司、浙江九洲新能源科技有限公司、台州市金宇机电有限公司、西安西玛电机有限公司、大连日牵电机有限公司、中车永济电机有限公司、杭州新恒力电机制造有限公司、佛山市顺德区乐普达电机有限公司、常州市昊升电机股份有限公司、山东招金集团有限公司、广东兆力电机集团有限公司、浙江通势达电动技术有限公司、上海电器科学研究所(集团)有限公司、浙江方威检验检测技术有限公司、上海梓一测控技术有限公司、东方电气集团东方电机有限公司、浙江龙创检测技术有限公司、江苏大通机电有限公司、慈溪市三佩机械有限公司、东莞市国梦电机有限公司、上海电科电机科技有限公司、上海市特种设备监督检验技术研究院、江苏肯德电机有限公司、哈尔滨电气集团先进电机技术有限公司、江苏鼎鑫智造科技股份有限公司、德瑞精工(深圳)有限公司。

本文件主要起草人：王传军、刘祺、宫建军、高淑瑜、钟治平、马洪杰、唐敏、王震、郭淑玲、许勇、贾荣生、彭东琨、张伟、左明明、阳金元、江洋、童陟嵩、李宝龙、赵英杰、周光厚、刘憬奇。

本文件及其所代替文件的历次版本发布情况为：

- 1977 年首次发布为 GB 1311—1977, 1989 年第一次修订；
- 2008 年第二次修订发布为 GB/T 1311—2008；
- 本次为第三次修订。

直流电机试验方法

1 范围

本文件规定了直流电机的试验要求,描述了试验方法。
本文件适用于 GB/T 755—2019 规定范围内的直流电机。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中,注日期的引用文件,仅该日期对应的版本适用于本文件;不注日期的引用文件,其最新版本(包括所有的修改单)适用于本文件。

GB/T 755—2019 旋转电机 定额和性能
GB 4824—2019 工业、科学和医疗设备 射频骚扰特性 限值和测量方法
GB/T 10068—2020 轴中心高为 56 mm 及以上电机的机械振动 振动的测量、评定及限值
GB/T 10069.1—2006 旋转电机噪声测定方法及限值 第 1 部分:旋转电机噪声测定方法
GB/T 25442—2018 旋转电机(牵引电机除外) 确定损耗和效率的试验方法

3 术语和定义

GB/T 755—2019 和 GB/T 25442—2018 界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

3.1

直流电机 direct current machine;d.c. machine

一种电机,其电枢绕组经换向器连接到直流系统,磁极由直流或波动电流励磁或为永久磁铁。

[来源:GB/T 2900.25—2008,411-31-05]

3.2

检查试验 routine test

对每台电机在制造完工后所进行的试验,以判明其是否符合标准。

[来源:GB/T 2900.25—2008,411-53-02]

3.3

热试验 thermal test

在规定的运行条件下,确定电机一个或几个部件温升的试验。

[来源:GB/T 2900.25—2008,411-53-28,有修改]

3.4

负载试验 load test

在规定的运行条件下,确定电机负载特性的试验。

3.5

空载试验 no-load test

电机作电动机运行时轴上无有效机械输出的试验,或作发电机运行时线端开路的试验。

[来源:GB/T 2900.25—2008,411-53-57]

3.6

效率 efficiency

输出功率对输入功率之比,通常以百分数表示。

[来源:GB/T 2900.25—2008,411-53-08]

3.7

超速试验 overspeed test

为确定电机转子能否满足规定的超速要求而在电机上进行的试验。

[来源:GB/T 2900.25—2008,411-53-39]

3.8

电流纹波因数 current ripple factor

波动电流的最大值 I_{\max} 和最小值 I_{\min} 之差与其 2 倍平均值 I_{av} (一个周期内的积分平均值) 之比。

[来源:GB/T 2900.25—2008,411-50-26]

4 符号

下列符号适用于本文件。

I : 电枢电流,单位为安培(A)。

I_0 : 空载电枢电流,单位为安培(A)。

I_f : 励磁电流,单位为安培(A)。

I_N : 额定电枢电流,单位为安培(A)。

J : 转动惯量,单位为千克二次方米($\text{kg} \cdot \text{m}^2$)。

K_1 : 绕组导体材料在 0°C 时电阻温度系数的倒数:

铜 $K_1 = 235$;

铝 $K_1 = 225$,除非另有规定;

如用其他材料,另行规定。

L_a : 电枢回路电感的试验值,单位为亨利(H)。

n : 试验时测得的转速,单位为转每分(r/min)。

p : 极对数。

P_0 : 空载输入功率,单位为瓦特(W)。

P_1 : 输入功率,励磁功率除外,单位为瓦特(W)。

P_2 : 输出功率,单位为瓦特(W)。

P_a : 电枢回路绕组损耗,单位为瓦特(W)。

P_b : 电刷电损耗,单位为瓦特(W)。

P_c : 恒定损耗,单位为瓦特(W)。

P_e : 励磁回路损耗,单位为瓦特(W)。

P_{Ed} : 励磁机损耗,单位为瓦特(W)。

P_{el} : 电功率,单位为瓦特(W)。

P_f : 励磁绕组损耗,单位为瓦特(W)。

P_{fe} : 铁耗,单位为瓦特(W)。

P_{fw} : 风摩耗,单位为瓦特(W)。

P_{LL} : 负载杂散损耗,单位为瓦特(W)。

P_{mech} : 轴功率,单位为瓦特(W)。

P_T : 总损耗,单位为瓦特(W)。

- R_0 :空载试验(每个电压点)绕组电阻,单位为欧姆(Ω)。
- R_1 :实际冷态下的绕组电阻,单位为欧姆(Ω)。
- R_a :电枢绕组电阻的平均值,单位为欧姆(Ω)。
- R_c :用于热试验的电枢绕组冷态电阻,单位为欧姆(Ω)。
- R_N :额定负载热试验结束时测取的第一点绕组热态电阻,单位为欧姆(Ω)。
- R_w :额定负载热试验结束时推导至 $t=0$ 时的绕组热态电阻,单位为欧姆(Ω)。
- T :修正后的转矩(实际转矩值),单位为牛顿米($N \cdot m$)。
- T_c :转矩读数修正值,单位为牛顿米($N \cdot m$)。
- T_d :转矩读数,单位为牛顿米($N \cdot m$)。
- T_{d0} :空载(与测功机连接)转矩读数,单位为牛顿米($N \cdot m$)。
- U_0 :空载电枢电压,单位为伏特(V)。
- θ_0 :空载试验时绕组温度,单位为摄氏度($^{\circ}C$)。
- θ_1 :测量绕组冷态电阻 R_1 时的绕组温度,单位为摄氏度($^{\circ}C$)。
- θ_{1c} :测量用于热试验的电枢绕组冷态电阻 R_c 时的绕组温度,单位为摄氏度($^{\circ}C$)。
- θ_a :冷却介质温度,单位为摄氏度($^{\circ}C$)。
- θ_c :试验时入口处冷却介质温度,单位为摄氏度($^{\circ}C$)。
- θ_{ref} :标准规定的基准温度,单位为摄氏度($^{\circ}C$)。
- θ_w :额定负载热试验达到热稳定状态时的绕组温度,单位为摄氏度($^{\circ}C$)。
- η :效率(%)。
- 注:其他符号和下标,在相关条款中说明。

5 基本要求

5.1 试验电源

5.1.1 普通电源

试验用普通电源可包括直流发电机组、蓄电池。

5.1.2 整流电源

试验用整流电源的电流纹波因数或波形因数应符合被试电动机技术条件的要求,整流器交流输入电压应对称,输出电压、电流波形应平衡、稳定、无干扰。

当直流电动机由整流电源供电时,脉动电压和脉动电流将影响电机的性能,与用普通电源(纯直流电源)供电的直流电动机相比,损耗和温升将会增加,换向更困难。

5.2 测试仪器

5.2.1 通用要求

环境条件应在仪器制造商给出的规定范围之内,如果可能的话,宜根据仪器制造商的说明书进行温度修正。

宜尽可能采用数字仪器。

模拟仪器的准确度通常以满量程的百分数表示,应根据实际情况尽量选择小的量程,观测读数宜在满量程的 $2/3$ 以上部分。

仪器特别是电流传感器的满量程应与被试电机的功率相匹配。

在进行电机负载试验中,输出功率和其他测量的参量会不可避免地缓慢波动,因此,各个试验点均

宜采用合适的数字仪器在不超过 15 s 的若干波动周期内采样较多(通常几百个)的数据,利用平均值确定效率。

5.2.2 电量测量仪

电量测量仪器应至少具有 0.5 级准确度(绝缘电阻表除外)。用直接法(见 14.3)确定电机效率时,为保证试验结果的准确性和重复性,仪器应至少具有 0.2 级准确度。

使用的分流器或传感器等,应至少具有 0.2 级准确度。

对小功率直流电机,应按附录 A 对输入电流和功率的测量值进行修正。

电压、电流平均值用磁电式仪表或能读出平均值的其他仪表(包括数字式仪表)来测量。电压、电流有效值用电动式仪表或能真实读出方均根数的其他仪表(包括数字式仪表)来测量。

测量电枢回路电压时,电压表应直接接在绕组出线端上。用分流器测量电流时,测量线的电阻应按所用毫伏表选配。

输入功率用电压乘电流来计算,试验电源为整流电源时,应用真实读数瓦特表或指示电压、电流瞬时值乘积平均值的其他测量装置直接测取电枢回路输入功率,也可分别测量直流功率分量和交流功率分量(见 14.4.3)然后相加求得。

5.2.3 转矩测量

测量效率时,转矩测量设备应至少具有 0.2 级准确度,测量的最小转矩值不应小于其标称转矩的 10%,如果转矩测量设备具有更高的准确度,则转矩测量范围可相应扩大。

注:比如准确度等级为 0.1 级,则意味着允许最小测试转矩为其标称转矩的 5%。

当采用带有底座支架结构的测功机方式测取电机轴转矩时(见图 1),应进行转矩修正试验以补偿负载设备的轴承摩擦损耗,这也适用于转矩测量设备与被试电机输出轴之间有轴承的情况。

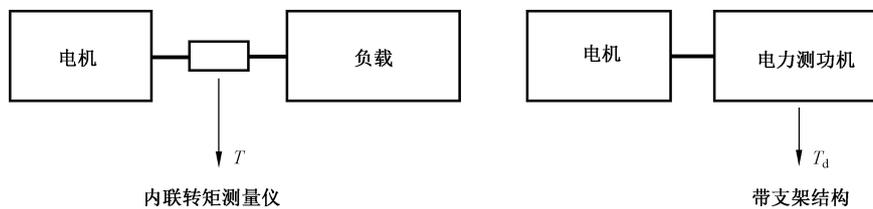


图 1 转矩测量

转矩读数应按照附录 B 进行修正。

注意转矩传感器亦即转子附近的温度可能会高于环境温度,这对其总体不确定度将产生明显的影响,在此情况下,温度影响所产生的不确定度不应超过满量程的 0.15%,如果无法保证,则应进行温度修正。

宜使用弹性联轴器并将轴系对准以尽可能减少寄生负载。

试验结束宜立即检查转矩测量设备的数据偏移情况,如果偏移超出容许的范围,应进行调整并重新试验。

用于其他试验时,转矩测量设备不应低于 0.5 级。

5.2.4 电阻测量

绕组的直流电阻用电桥或数字式微欧计测量,应具有 0.2 级准确度。当用于检查试验时,不应低于 0.5 级。

5.2.5 转速测量

测量转速的仪器应具有 0.1 级准确度或误差不超过 $\pm 1 \text{ r/min}$, 取两者误差最小者。

5.2.6 温度测量

温度计(包括检温计)的最大允许误差不应超过 $\pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

5.2.7 绝缘电阻测量

绝缘电阻表的准确度等级不应低于 5 级。

5.3 试验前检测

5.3.1 一般检查

试验前, 应检查电机的装配质量和轴承运行情况, 以保证各项试验能顺利进行, 试验线路和设备应能满足试验要求。

5.3.2 中性线的测定

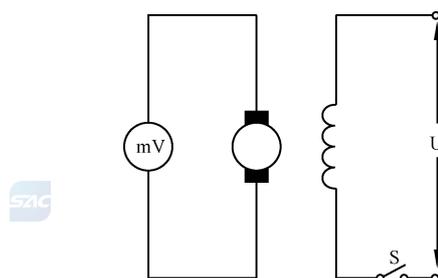
5.3.2.1 通用要求

中性线的测定有感应法、正反转发电机法、正反转电动机法。试验前, 电刷与换向器工作表面应正常接触。

5.3.2.2 感应法

感应法测定中性线, 应按 a) 或 b) 进行试验。

- a) 试验线路图见图 2, 测试时电枢静止, 励磁绕组他励, 将毫伏表接在相邻的两组电刷上, 并交替地接通和断开电机的励磁电流, 逐步移动刷架的位置, 在每一个不同位置上测量电枢绕组的感应电势, 当感应电势最接近零时, 即可认为电刷位于中性线上, 毫伏表的读数推荐以励磁电流断开时的读数为准。



标引序号说明:

mV —— 毫伏表;

S —— 励磁开关;

U —— 励磁电源。

图 2 感应法测定中性线试验线路图

- b) 电枢静止, 励磁绕组他励, 交替地接通和断开电机的励磁电流, 在距离等于或接近于一极距的两片换向片上测量感应电势, 沿换向器圆周移动, 正负感应电势各量取几点读数, 然后按图 3 所示的作图法求出中性线位置。

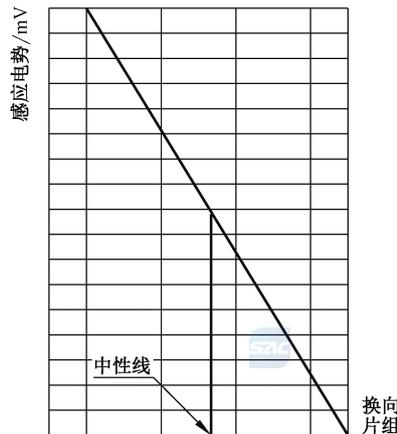


图 3 作图法测定中性线

5.3.2.3 正反转发电机法

试验时,电机励磁绕组他励,在保持转速、励磁电流及负载(接近额定值)不变的情况下,逐步移动刷架位置,在每一个不同位置上测量电机在正转及反转时的电枢电压,直到两个电压数值最接近时为止,此时即可认为电刷位于中性线上。

5.3.2.4 正反转电动机法

试验时,在保持电机电枢电压、励磁电流及负载(接近额定值)不变的情况下,逐步移动刷架位置,在每一个不同位置上测量电机在正转及反转时的速度,直到两个方向的转速最接近时为止,此时即可认为电枢位于中性线上。

5.4 试验电阻及温度

5.4.1 试验电阻

绕组电阻 R 是流过电枢电流的所有绕组(电枢绕组、换向极绕组、补偿绕组和复励绕组)的总电阻值,单位为欧姆(Ω),用适当的方法测定。

励磁绕组电阻 R_f ,单位为欧姆(Ω)。

热试验结束时电阻的测定应按 13.7.3 所述的外推法,用尽可能短的时间而非表 4 中规定的时间间隔,然后外推到零。

绕组温度应按 5.4.2 确定。

5.4.2 绕组温度

绕组温度 θ_w 应按下述一种方法确定(按所列排序):

a) 由 5.4.1 所述的外推法求得的额定负载试验电阻 R_w 来确定;

注:用于监管目的的检查试验电机不能拆卸,则采用测试电阻的方法来代替测试绕组温度。

b) 由埋置检温计(ETD)或热电偶直接测得;

c) 根据同一结构和电气设计完全相同的电机按 a) 所得的温度来确定;

d) 若无负载能力时,按间接法(见 13.8.1.3)来确定;

e) 当不能直接测量额定负载试验电阻 R_w 时,应假定绕组温度等于表 1 中列出的额定热分级下的基准温度 θ_{ref} 。

表 1 绝缘结构热分级对应的基准温度

绝缘结构热分级	基准温度 ℃
130(B)	95
155(F)	115
180(H)	135
200(N)	155
注：220 及以上耐热等级很少用于目前的绝缘结构，因此本文件中未列出。	

如按照低于结构使用的热分级规定额定温升或额定温度，则应按较低的热分级规定其基准温度。

5.4.3 修正到基准冷却介质温度

试验中记录的 R 值应折算到 25 ℃ 标准基准温度。将绕组电阻修正到 25 ℃ 标准基准冷却介质温度。

R 的温度修正系数应按公式(1)确定：

$$k_{\theta} = \frac{K_1 + \theta_w + 25 - \theta_c}{K_1 + \theta_w} \dots\dots\dots (1)$$

式中：

k_{θ} ——绕组温度修正系数；

K_1 ——绕组导体材料在 0 ℃ 时电阻温度系数的倒数，对铜绕组，为 235；对铝绕组，为 225(除非另有规定)；

θ_c ——试验时入口处冷却介质温度，单位为摄氏度(℃)；

θ_w ——按 5.4.2 确定的绕组温度，单位为摄氏度(℃)。

对以水为初级或次级冷却介质的电机，水的基准温度应按 GB/T 755—2019 中表 5 的规定为 25 ℃。也可为根据协议规定的其他数值。

5.5 试验条件

5.5.1 试验环境

除非另有约定，试验时周围空气温度应在 10 ℃ ~ 40 ℃ 之间，且海拔不超过 1 000 m。

5.5.2 旋转方向

若未规定旋转方向，从换向器端看，电机应顺时针旋转。

5.5.3 电机试验定额

除非另有约定，本文件规定的额定负载应为额定电流。

6 绕组对机壳及绕组相互间绝缘电阻的测定

6.1 测量时电机的状态

测量电机绕组的绝缘电阻时，应分别在实际冷态下和热态(热试验后)下进行。检查试验时，如无其

他规定,可在实际冷态下进行测量,但应保证热态绝缘电阻不低于该类型电机标准的规定。测量绝缘电阻时应同时测量并记录绕组温度,在实际冷态下测量时可取周围介质温度作为绕组温度。

6.2 绝缘电阻表的选择

测量绕组对机壳及绕组相互间绝缘电阻,应根据被测绕组的额定电压按表 2 选择绝缘电阻表。

表 2 绝缘电阻表的选择

单位为伏特

被测绕组额定电压 U_N	绝缘电阻直流测量电压
$U_N \leq 36$	250
$36 < U_N \leq 1\ 000$	500
$1\ 000 < U_N \leq 2\ 500$	1\ 000
$2\ 500 < U_N \leq 5\ 000$	2\ 500
$U_N > 5\ 000$	5\ 000

6.3 测量方法

电枢回路绕组(不包括串励绕组)、串励绕组和并励绕组对机壳及其相互间的绝缘电阻应分别进行测量。

测量时,应在试验电压施加 1 min 后读取数据,并记录绕组温度。

若测量介电吸收比(DAR),则应分别测取施加试验电压 30 s 和 60 s 时的绝缘电阻 R_{30} 和 R_{60} , $DAR = R_{60} / R_{30}$ 。

若测量极化指数(PI),则应分别测取施加电压后 1 min 和 10 min 时的绝缘电阻 R_{10} 和 R_{100} , $PI = R_{100} / R_{10}$ 。

绝缘电阻测量结束后,每个回路应对地放电。

7 绕组在实际冷态下电阻的测定

7.1 实际冷态下绕组温度的测定

试验前,将电机在室内静置一段时间,用温度计(或埋置检温计)测量电机绕组的温度 θ_1 ,所测绕组温度与冷却介质温度之差不应超过 2 K,若绕组的温度无法测量,允许用机壳的温度代替。对大、中型电机温度计的放置时间不应少于 15 min。

按短时工作制(S2 工作制)试验的电机,在试验开始时的绕组温度与冷却介质温度差不应超过 5 K。

7.2 绕组电阻的测量方法

7.2.1 电桥法

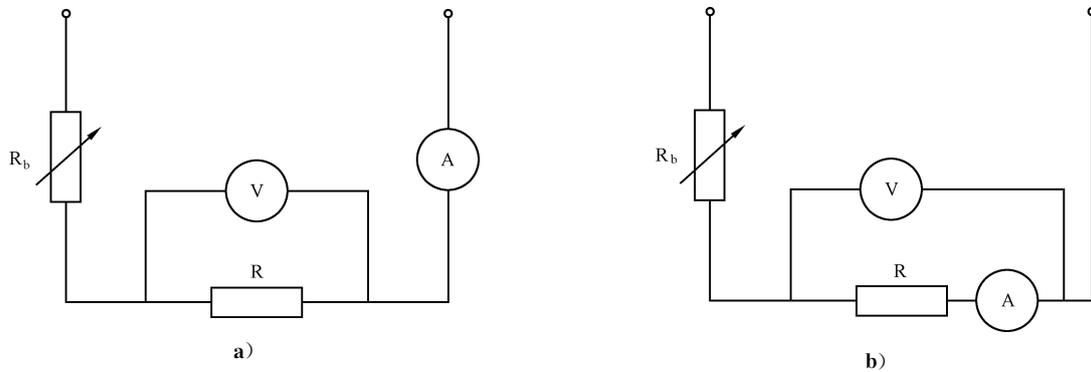
使用电桥测量时,应在电桥重新平衡后测取读数。测量 1 Ω 及以下的电阻时,应采用开尔文双电桥测量。

7.2.2 直流电压表-电流表法

电压表-电流表法原理接线图见图 4。图 4a) 适用于电压表内阻与被测电阻之比大于或等于

200,图 4b) 适用于电流表内阻与被测电阻之比小于 1/200。

测量时,所加电流不应超过绕组额定电流值的 10%,每次通电时间不超过 1 min。测量时应同时读取电流值和电压值。



标引序号说明:

- R_b —— 调节限流电阻;
- R —— 被测绕组端电阻;
- V —— 电压表;
- A —— 电流表。

图 4 电压表-电流表法原理接线图

7.2.3 微欧计法

当采用自动检测装置或数字式微欧计等仪表测量 R 时,通过被测绕组的试验电流不应超过其正常运行时电流的 10%,通电时间不应超过 1 min。若电阻小于 0.01 Ω,则通过被测绕组的电流不宜太小。

7.2.4 注意事项

测量电机各部分绕组电阻时,转子应静止不动,每一绕组测量 3 次,每次读数与 3 次读数的平均值之差,应在平均值的 ±0.5% 范围内,取其平均值作为绕组电阻的实际值,并同时记录绕组温度。

检查试验时,每一个电阻可仅测量 1 次。

7.3 电枢绕组电阻的测定

7.3.1 试验方法

按 7.2 测量电枢绕组电阻时,应将电刷自换向器上提起或与换向器绝缘,根据电枢绕组的型式按下列方法进行。

- a) 对单波绕组,应在距离等于或最接近于奇数极距的两片换向片上进行测定,测得的电阻即为电枢绕组电阻。
- b) 对无均压线的单叠绕组,应在换向器直径两端的两片换向片上进行测定,电枢绕组电阻 R_a 由公式(2)计算:

$$R_a = \frac{R}{p^2} \dots\dots\dots (2)$$

式中:

- R —— 测得的电阻值,单位为欧姆(Ω);
- p —— 极对数。

- c) 对装有均压线的单叠绕组,应在距离等于或最接近于奇数极距,并都装有均压线的两片换向片

上进行测定,测得的电阻即为电枢绕组电阻。

- d) 对装有均压线的复叠或复波绕组,应在距离最接近于一极距,并都装有均压线的两片换向片上进行测定,测得的电阻即为电枢绕组电阻。
- e) 蛙绕组——单蛙绕组应在相隔一个极距的两片换向片上测量;双蛙绕组应在相邻的两片换向片上测量;三蛙绕组应在相隔一个极距的两片换向片上测量。如 $K/2p$ 不是整数时,应加修正值 $\pm m/2$ 。电枢绕组电阻 R_a 由公式(3)计算:

$$R_a = \frac{R}{(\alpha/K + 1) \times m^2} \dots\dots\dots(3)$$

式中:

- R ——测得的电阻值,单位为欧姆(Ω);
- α ——蛙绕组的电阻系数,见表 3;
- K ——换向片数;
- m ——绕组的重路数。

表 3 蛙绕组的电阻系数

$2p$	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24
α	8.00	27.71	61.25	110.11	175.43	258.13	359.02	478.77	617.98	777.21	956.92

- f) 其他型式电枢绕组电阻的测量方法,应根据绕组的具体结构,采用相应的方法。

7.3.2 注意事项

按 7.2.1 测量电枢绕组电阻时,电刷自换向器上提起或与换向器绝缘有困难而将电刷放在换向器上,应在位于两组相邻电刷的中心线下面,距离等于或最接近于一极距的两片换向片上进行测量。

7.3.3 用于热试验的电枢绕组冷态电阻的测定

用于热试验的电枢绕组冷态电阻 R_c 的测定,可在位于相邻两组电刷之间,距离约等于极距一半的两片换向片上进行测量,并在这两片换向片上做好标记。此时,测得的绕组温度记为 θ_{1c} 。

大型电机测量电枢绕组冷态电阻时,应在换向器上多选择几组不同位置的换向片。热试验时,在电机断能停转后,总有一组换向片位于相邻电刷之间,可测量电枢绕组热态电阻。

8 轴电压的测定

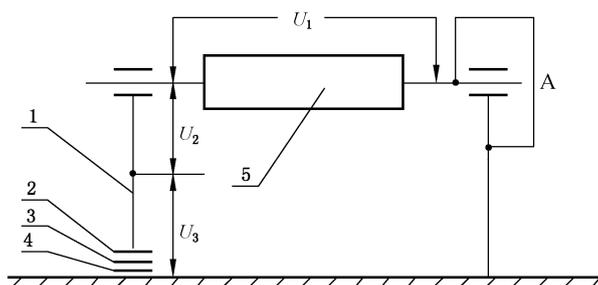
轴电压测定示意图见图 5。

试验前,应分别检查轴承座与金属垫片、金属垫片与金属底座间的绝缘电阻。

在电机轴承与机壳之间加装绝缘环(轴承和转轴之间垫入干燥的绝缘片)或者使用绝缘轴承,确保电机轴承绝缘良好。

第一次测定时,被试电机应在额定电压、额定转速下空载运行,用高内阻毫伏表测量轴电压 U_1 ,然后用导线 A 将转轴一端与地短接,测量另一轴承座对地轴电压 U_3 ,测量完毕将导线 A 拆除。试验时,测点表面与毫伏表引线的接触应良好。

第二次测定时,被试电机在额定电流、额定转速下短路或额定负载运行,测量轴承电压 U_2 。对调速电机可仅在最高额定转速下进行检查。



标引序号说明：

- 1——轴承座；
- 2——绝缘垫片；
- 3——金属垫片；
- 4——绝缘垫片；
- 5——转子。

图 5 轴电压测定示意图

9 电感的测定

9.1 确定电枢回路电感

9.1.1 通用要求

试验时，由电机电枢回路端子通入 50 Hz 或 60 Hz 的单相交流电，应固定电枢防止转动，使用电机原有的电刷，交流电流限制在电机额定电流的 20% 左右，以避免在短暂的试验期间电刷和换向器过热。试验开始前和结束后进行检查，电刷应和换向器表面接触良好。

在提及电感值时，应说明其对应的饱和或不饱和状态。

测取并记录电压 U 和电流 I 的有效值(rms)、频率 f 以及电压和电流的相角，相角可通过诸如示波器或相位计等相应的方法测取，或者采用瓦特表间接求得。

9.1.2 并(他)励和复励电机电枢回路电感测定

警示——不饱和状态试验时，若并(他)励磁绕组开路，绕组内会感应产生高电压，在其端子上会损坏电机及伤害试验人员。

在饱和及不饱和两种状态下测定并(他)励和复励电机电枢电感。

不饱和状态试验时，并(他)励磁绕组应短接，以避免绕组内感应高电压。饱和状态试验时，并(他)励磁绕组由直流电源供电，通以额定励磁电流，要求直流电源的电流纹波因数不超过 6%。

9.1.3 串励电机电枢回路电感测定

串励电机仅进行饱和状态下试验。试验时，串励绕组应由直流电源他励，通以额定电流，要求直流电源的电流纹波因数不超过 6%。

求得的饱和电感，并不包括由于串励磁场引起的附加电感，此电感应按 9.2.3 饱和并励磁试验测定。

9.1.4 基于实测值计算电枢回路电感 L_a

电枢回路电感 L_a 按公式(4)求得：

$$L_a = \frac{U \times \sin\theta}{2 \times \pi \times f \times I} \dots\dots\dots(4)$$

式中：

- L_a ——电枢回路电感的试验值,单位为亨利(H);
 - U ——交流电压的有效值,单位为伏特(V);
 - θ ——交流电压、交流电流间的相角,单位为弧度(rad);
 - f ——频率,单位为赫兹(Hz);
 - I ——交流电流的有效值,单位为安培(A)。
- U 、 I 、 f 和 θ 是按 9.1.1 直接测定的。

9.1.5 负载状态下的饱和电枢回路电感

为确定负载状态下饱和电枢回路电感,应将被试电机作为发电机在特定的负载电流状态下运行,并且应如图 6 所示使用一台交流发电机、一个电容器 C 和一个电感 L 将 20%左右额定电流的交流电流叠加在直流负载电流上。

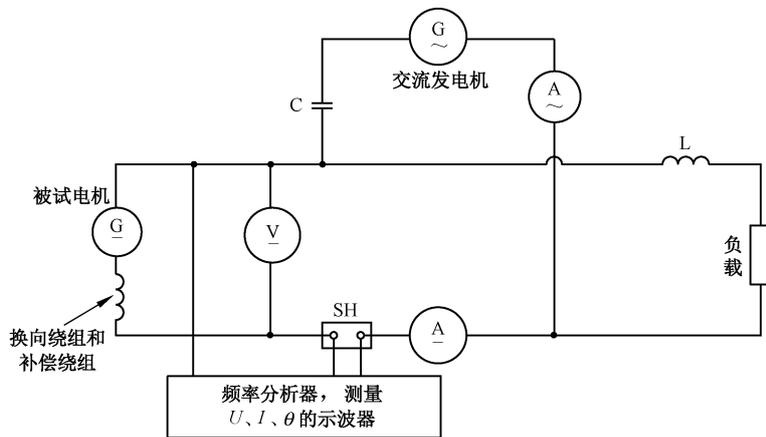


图 6 负载状态下的饱和电枢回路电感测定

电枢回路电感用交流电压、交流电流的有效值,按 9.1.4 中的公式(4)计算。

9.2 确定并(他)励磁绕组电感

9.2.1 通用要求

通过并(他)励磁绕组端子突加电压,依其内部电流的增长速率确定并(他)励磁绕组的电感。用机电刷处出现的电枢电压所显示的直轴磁通增长速率计算该绕组的有效电感。试验时,电枢开路,电机驱动到相应于额定转速下运行。在不饱和与饱和两种状态下进行试验。

在提及电感值时,应说明其对应的饱和或不饱和状态。

9.2.2 不饱和并(他)励磁绕组电感

测定不饱和电感时,励磁绕组应用一在被试电机额定励磁电流时电压调整率小于 2% 的电源他励。调节励磁电压,使电枢电压在额定值和零之间缓慢循环两次,然后降低电枢电压到 50% 额定值左右。

记下此时励磁电压作为预定值,再将励磁电压减小到零,断开励磁回路,然后调节励磁电压到预定值,将励磁回路闭合,观察并摄录励磁电压、励磁电流和电枢电压相对于时间的变化过程。

9.2.3 饱和并(他)励励磁绕组电感

为测量饱和电感,应设置并(他)励磁场(见图7),使当励磁电压有突变时,在开路的电枢回路上产生90%~110%额定电压的变化。闭合开关,调节励磁电压 U_f ,产生110%额定电枢电压 U_a 。打开开关,调节 R_{ext} 使电枢电压 U_a 在90%~110%额定值之间变动两次,停在90%额定值处。然后闭合开关,观察并摄录励磁电压、励磁电流和电枢电压相对于时间的变化过程。

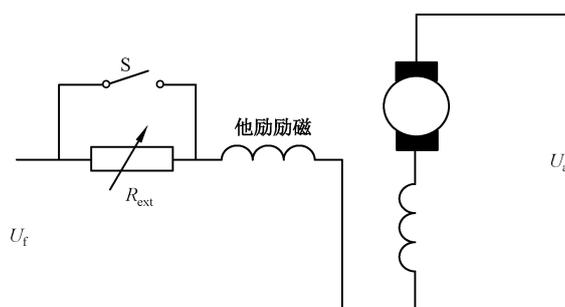


图7 测量饱和并(他)励励磁绕组电感的试验线路

9.2.4 考虑涡流影响时并(他)励励磁绕组电感值

能根据励磁电流的瞬态值来计算考虑了电机铁心涡流影响的励磁绕组电感。

在半对数坐标纸上绘制 $(I_{f\infty} - I_f)/I_{f\infty}$ 与时间 t 的关系,前者用对数坐标, I_f 是突加励磁电压后励磁电流变化的幅值, $I_{f\infty}$ 是其最终值,见图8。 P 和 Q 是曲线直线部分中任意取的两点, a 是直线的延长部分与对数坐标轴的交点值。

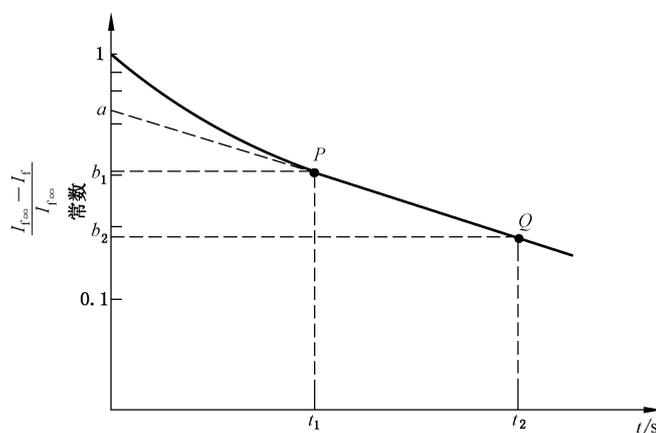


图8 励磁绕组电感测定

按公式(5)计算衰变常数 c 值:

$$c = \frac{\ln b_1 - \ln b_2}{t_2 - t_1} \dots\dots\dots (5)$$

式中:

b_1 ——在时间 t_1 时的 $(I_{f\infty} - I_f)/I_{f\infty}$ 值;

b_2 ——在时间 t_2 时的 $(I_{f\infty} - I_f)/I_{f\infty}$ 值。

励磁绕组电感 L_f 按公式(6)计算:

$$L_f = R_f \times \frac{a}{c} \dots\dots\dots (6)$$

式中：

R_f ——励磁绕组电阻，单位为欧姆(Ω)。

注：此公式依据了公式(7)的近似等式。

$$I_f = I_{f\infty} \times \left(1 - \frac{\tau_f}{\tau_f + \tau_e} \times e^{-\frac{t}{\tau_f + \tau_e}} \right) \dots\dots\dots (7)$$

式中：

τ_f ——励磁回路的时间常数；

τ_e ——等效涡流回路的时间常数。

9.2.5 不考虑涡流影响时并(他)励励磁绕组电感值

不考虑铁心涡流影响，并(他)励励磁绕组电感试验值应按公式(8)、公式(9)计算：

$$L_f = R_f \times \tau_{fi} \dots\dots\dots (8)$$

$$L_{feff} = R_f \times \tau_{aU} \dots\dots\dots (9)$$

式中：

L_f ——并(他)励励磁绕组电感，单位为亨利(H)；

R_f ——试验结束后直接测得的并(他)励励磁绕组电阻，单位为欧姆(Ω)；

τ_{fi} ——励磁电流变化量达到最大值的 63.2%时的时间，单位为秒(s)；

L_{feff} ——并(他)励励磁绕组有效电感，单位为亨利(H)；

τ_{aU} ——电枢电压变化量达到最大值的 63.2%时的时间，单位为秒(s)。

10 空载试验

10.1 通用要求

被试电机可独自作为电动机运行来进行试验，或与驱动电机对接作为发电机运行(轴端驱动功率的转矩按输入输出法测量)来进行试验。

空载试验应在电机额定负载试验后热态下立即进行。

如不具备条件，也可在冷态下开始，但是电机空载损耗应稳定。若在 30 min 间隔两次连续测量的空载输入功率变化不超过 3%，则认为空载损耗稳定。

10.2 空载发电机法

试验时，电机以空载发电机方式运行，励磁绕组他励，保持额定转速不变，逐步增加电机的励磁电流，直到电枢电压接近额定值的 110%时为止，然后逐步减小励磁电流到零，做上升或下降分支时各读取不少于 8 个点读数；在近似均布于 110%~80%额定电压之间读数至少 4 点；在近似均布于 70%~30%额定电压之间，读数至少 4 点。

如电机的磁路比较饱和，电枢电压不能调节到上述数值时，则应调节到可能达到的最大电压时为止，但需注意不使励磁绕组过热。

试验过程中，励磁电流只可向同一方向调节，如需反向调节，应先将励磁电流回调到零(上升分支)或增加到最大值(下降分支)，然后再调节到所需数值。

10.3 空载电动机法

试验时，励磁绕组他励，并由其他可变电电压的直流电源给电枢供电，作空载电动机运行，加在电枢上的电压从额定电压的 30%左右到 110%左右调节，调节励磁电流保持额定转速不变。做上升或下降分支时各读取不少于 8 个点读数；在近似均布于 110%~80%额定电压之间读数至少 4 点；在近似均布于

70%~30%额定电压之间或调到电流不再减小为止,读数至少4点。

在低电压时,电动机运行很不稳定,不应使电机超速。

10.4 记录数据

试验宜尽可能快地进行,并按电压递减的顺序读取读数。

在每一个电压值同时读取: U_0 、 I_0 (若有)、 P_0 、 I_f 。

试验开始前或试验结束后应立即测取 R_0 ,或测取绕组温度 θ_0 。

中间各试验点的绕组电阻值按照与电功率 P_0 呈线性关系采用内插法计算确定,起始点为试验前和试验后测得的电阻值。

如果由于电阻值过小而无法进行测量时,可采用计算值。

与驱动电机对接的电机, P_0 由 T 和 n 确定。

11 整流电源供电时电机的电压、电流纹波因数及电流波形因数的测定

11.1 通用要求

本试验用于确定整流电源供电直流电机在额定运行条件下的端电压和电枢电流的变化。

电枢电流纹波宜使用能读出直流和交流值的示波器来测量,另一方法是用峰-峰值电压表读取串联在电枢回路的无感电阻器的电压。

可使用示波器、合适的录波器或者是串以电容量足够大不至于影响交流读数的隔直电容器的电子式峰-峰值电压表测取电压纹波。在测量峰-峰值过程中,宜忽略高频尖峰脉冲引起的主波形的偏移。

在整流电源供电的情况下,电枢电压和电流的直流平均值能用磁电式仪表或能读出真实平均值的其他仪表(包括数字式仪表)来测量。

11.2 电压、电流纹波因数的计算

11.2.1 概述



根据GB/T 755—2019中3.29的规定,电流纹波因数 q_i 为:波动电流的最大值 I_{\max} 和最小值 I_{\min} 之差与其2倍平均值 I_{av} (一个周期内的积分平均)之比,如公式(10):

$$q_i = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{2 \times I_{\text{av}}} \dots\dots\dots (10)$$

注1:如电流纹波值较小,纹波因数近似由公式(11)表示:

$$q_i = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} \dots\dots\dots (11)$$

注2:如 q_i 的计算结果等于或小于0.4,公式(11)用于近似计算。

11.2.2 电压、电流波形不间断时纹波因数的计算

电压、电流波形不间断时,见图9,其纹波因数应分别按公式(12)、公式(13)计算:

$$q_u = \frac{U_{\max} - U_{\min}}{U_{\max} + U_{\min}} \dots\dots\dots (12)$$

式中:

q_u ——电压纹波因数;

U_{\max} ——波动电压最大值,单位为伏特(V);

U_{\min} ——波动电压最小值,单位为伏特(V)。

$$q_i = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} \dots\dots\dots (13)$$

式中：

- q_i —— 电流纹波因数；
- I_{\max} —— 波动电流最大值,单位为安培(A)；
- I_{\min} —— 波动电流最小值,单位为安培(A)。

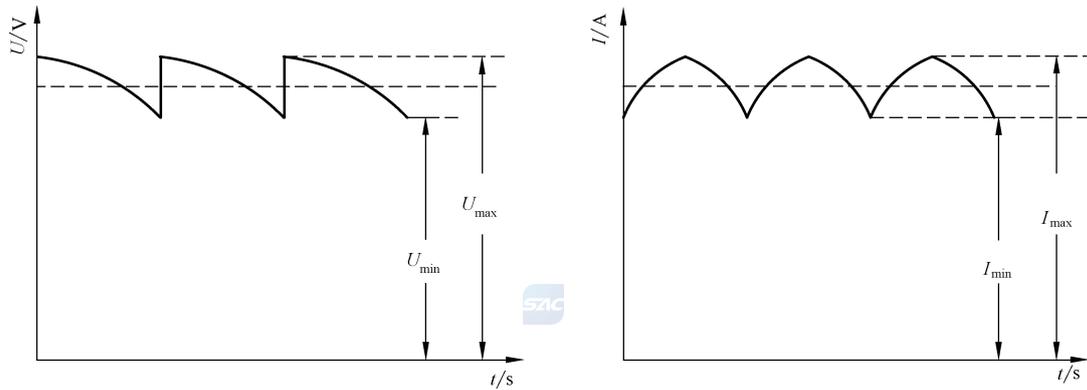


图 9 不间断电压、电流波形

11.2.3 电压、电流波形间断时纹波因数的计算

电压、电流波形间断时,见图 10,其纹波因数应分别按公式(14)、公式(15)计算：

$$q_u = \frac{U_{\max} - U_{av}}{U_{av}} \dots\dots\dots (14)$$

式中：

- q_u —— 电压纹波因数；
- U_{\max} —— 波动电压最大值,单位为伏特(V)；
- U_{av} —— 直流电压平均值,单位为伏特(V)。

$$q_i = \frac{I_{\max} - I_{av}}{I_{av}} \dots\dots\dots (15)$$

式中：

- q_i —— 电流纹波因数；
- I_{\max} —— 波动电流最大值,单位为安培(A)；
- I_{av} —— 直流电流平均值,单位为安培(A)。

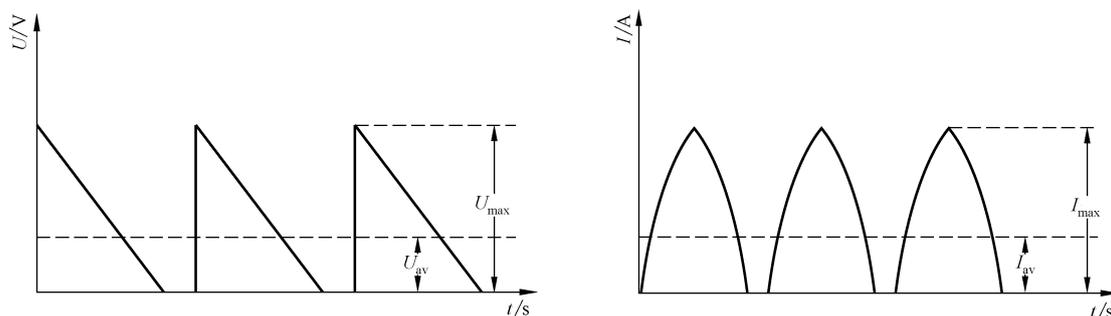


图 10 间断式电压、电流波形

11.3 额定直流电流波形因数的计算

直流电动机电枢由整流电源供电时的额定直流电流波形因数,按公式(16)计算:

$$k_{fN} = \frac{I_{\text{rms,maxN}}}{I_{\text{avN}}} \dots\dots\dots (16)$$

式中:

k_{fN} —— 额定直流电流波形因数;

$I_{\text{rms,maxN}}$ —— 额定条件下最大允许电流的有效值,单位为安培(A);

I_{avN} —— 额定条件下直流电流平均值,单位为安培(A)。

12 额定负载试验

12.1 概述

直流发电机的额定负载试验,是当发电机在额定电流、额定电压及额定转速下,确定额定励磁电流。

直流电动机的额定负载试验,是当电动机在额定电流、额定电压、额定励磁电流或额定励磁电压下(对不带磁场变阻器的并励电机)校核转速。

小功率直流电动机的额定负载试验,是当电动机在额定功率或额定转矩、额定电压、额定励磁电压下,确定额定电流及校核转速。

12.2 分马力电动机负载试验

应采用测功机、转矩仪等方式测取分马力电动机负载特性。

对于连续工作制(S1工作制)电动机,试验前,电机应在额定负载下运行直至基本达到热稳定(30 min内变化不超过1 K)。对于S2工作制电动机,在进行负载试验前,额定负载应运行在额定周期的时间段。从2.5倍~3倍额定负载电流开始负载试验,读数并按照约25%的间隔逐步降低至空载,对于串励电机,则降低至最大安全转速。应在每一个负载读取电压、(输入)电流、并励励磁电流(只要有终端)、转速和转矩。

12.3 整马力电动机负载试验

12.3.1 负载

小的整马力电动机可用负载发电机、测功机等带或者不带转矩仪进行负载。

对于大的整马力电动机,通常不具备直接测量输出转矩的条件。假如能提供两台型号和定额相同的电机进行试验,可采用回馈法(若需要,可增加升压机)。若没有相同型号和定额的电机,可用一台校

准过的直流发电机给被试电机加载进行负载试验。

12.3.2 试验方法

对于 S1 工作制电动机,试验前,电机应在额定负载下运行直至基本达到热稳定(30 min 内变化不超过 1K)。

对于 S2 工作制电动机,在进行负载试验前,额定负载应运行在额定周期的时间段。

无弱磁调速的电动机按 a) 进行试验,有弱磁调速的电动机按 b) 进行试验:

- a) 应从 1.5 倍额定负载电流开始负载试验,读数并按照约 25% 的间隔逐步降低至空载,若是串励电机,则按照约 25% 的间隔逐步降低至最高安全转速;
- b) 可在基本转速(满励)和最大额定转速(弱磁)两处进行负载试验;按照 a) 中的步骤进行,但注意电机在最高速度运行时的速度稳定性。

12.4 读数

读数包括输入(或输出)电流和电压、转速和输入(或输出)转矩、环境温度、电枢温度或电阻以及励磁绕组温度或其电阻,应从 0.25 倍~1.5 倍额定负载等距离间隔同时读取 6 个负载点,若为串励电机则最小负载取决于其转速限制。对于用于性能测定的读数,电机温升应介于额定温升的 50%~100% 之间。

在常规检查的负载试验中可省略转矩测量,而且电机额定运行的持续时间由该类型电机标准规定。

12.5 换向检查试验

电机的换向检查应在电机额定负载试验中同时进行。检查的方法是将负载自空载或 1/4 额定负载(对不允许空载的电机)调节到所需要的负载。运行时,电刷位置不变,观察在换向器及电刷上的火花等级(电机火花等级判定见附录 C)。

整流电源供电时,电机换向将受交流侧电抗、直流侧电抗器或阻抗以及交流电压与直流电压之间的关系等影响。因此,在判断换向时,使用与最终应用电源具有尽可能相似特性的电源是很重要的。在整流电源供电时,明显可见的换向火花通常更为严重,宜长时间观察换向,以准确评估是否发生有害火花。

13 热试验

13.1 目的

热试验的目的是确定电机在额定负载条件下运行时绕组的工作温度和特定部件温度高于冷却介质温度的温升值。

13.2 一般性说明

被试电机应安装好所有将影响温升的部件、端盖和附件等。电机热试验进行前,应正确地调节其换向和整定。

应对被试电机予以防护以阻挡其他机械产生的气流的影响,一般非常轻微的气流足以使热试验结果产生很大的偏差。引起周围空气温度快速变化的环境条件对热试验是不适宜的,电机与设备之间应有足够的空间,允许空气自由流通。

为避免由于大型电机的温度不能迅速地随冷却介质温度相应变化产生时滞而引起的误差,应采取一切适当的措施以减少冷却介质温度的变化。

对于整流电源供电的电机,应使用电机实际运行中使用的整流电源或其额定值所依据的整流电源来进行热试验。若没有合适的整流电源,可通过使用直流发电机组(直流电枢电源)并将电枢电流保持

在整流电源工作时所具有的有效值来加热电机,由于存在附加的绕组 I^2R 损耗和铁耗,实际整流电源运行中的电机温度将高于试验值,尤其是在封闭式电机的情况下。

13.3 试验前电机的温度

如用电阻法确定绕组温度,初始绕组温度与冷却介质的温度差不应大于 2 K。

按 S2 工作制试验的电机,在热试验开始时的温度与冷却介质温度差应在 5 K 以内。

13.4 热试验时冷却介质温度的测定

13.4.1 无冷却器的封闭式电机(用环境空气或气体冷却)

环境空气或气体的温度应采用几个温度计来测量,温度计应置于电机周围不同的地点,高度为电机的 1/2,距离电机 1 m~2 m 处,并应防止热辐射和气流的影响。

13.4.2 开启式电机和用远处的空气或气体通过风道冷却的电机或有独立冷却器的电机

初级冷却介质的温度应在进入电机处测量。

13.4.3 带有外装式或内装式冷却器的封闭式电机

初级冷却介质的温度应在电机的入口处测量,次级冷却介质的温度应在冷却器的入口处测量。

13.4.4 试验结束时冷却介质温度的测定

13.4.4.1 S1 工作制和断续周期工作制(S3 工作制)电机

对 S1 工作制和 S3 工作制定额的电机,试验结束时的冷却介质温度应取在整个试验过程中最后 1/4 时间内,按相等时间间隔测得的几个温度计读数的平均值作为试验中冷却介质温度。

13.4.4.2 S2 工作制电机

对 S2 工作制电机,试验结束时的冷却介质温度,若定额为 30 min 及以下,取试验开始与结束时温度计读数的平均值;若定额为 30 min~90 min,取 1/2 试验时间,与试验结束时温度计读数的平均值,作为试验中冷却介质的温度。

13.5 温升的测定方法

13.5.1 电阻法

利用被测绕组电阻在受热后增大的关系来确定绕组的温升,测得的温升是绕组的平均温升。

绕组的温升 $\Delta\theta$ [单位为开尔文(K)]由公式(17)计算:

$$\Delta\theta = \frac{R_2 - R_1}{R_1} \times (K_1 + \theta_1) + \theta_1 - \theta_a \quad \dots\dots\dots(17)$$

式中:

R_2 ——试验结束时的绕组电阻,单位为欧姆(Ω),按 13.7 确定;

R_1 ——实际冷态下的绕组电阻,单位为欧姆(Ω);

K_1 ——绕组导体材料在 0 °C 时电阻温度系数的倒数,对铜绕组,为 235;对铝绕组,为 225(除非另有规定);

θ_1 ——实际冷态下的绕组温度,单位为摄氏度($^{\circ}\text{C}$);

θ_a ——试验结束时冷却介质的温度,单位为摄氏度($^{\circ}\text{C}$)。

注:例如,通常用 7.3.3 中测量的电枢绕组冷态电阻 R_c 来计算电枢绕组温升。

13.5.2 埋置检温计法

即将电阻检温计、热电偶或半导体热敏元件等在电机制造过程中,埋置于电机制成后所不能达到的部位,检温计应适当分布在电机绕组中,其数量不应少于6个。在保证安全的前提下,宜尽可能使检温计埋置于预计绕组为最热点的各个部位,并应有效地防止检温计与初级冷却介质接触。埋置检温计元件的最高读数作为绕组温度的读数。

13.5.3 温度计法

温度计包括膨胀式温度计(例如:水银、酒精等温度计),半导体温度计及非埋置的热电偶或电阻温度计。有强交变磁场的地方不能采用水银温度计。用此法测量温度时,应将温度计贴附于电机被测部分可接触到最热点的表面,以测出接触点表面的温度,被测点与温度计的热传导宜尽可能良好,并用绝热材料覆盖,以减少热量的泄漏。

13.6 热试验时电机各部分温度的测定

13.6.1 定子绕组

定子绕组温度应用电阻法测定。对低电阻绕组,如串励绕组、换向极绕组及补偿绕组,也可用温度计法测定,各绕组所安放的温度计不应少于2支。

13.6.2 电枢绕组

电枢绕组的温度应用电阻法测定,应于电机断能停转后,在测量电枢绕组冷态电阻的同样两片换向片上立即进行。

13.6.3 电枢铁心

电枢铁心齿部和钢丝扎箍的温度,用温度计法或埋置检温计法测定。测定时,应于电机断能停转后,立即测取不少于两点的温度。

13.6.4 换向器

换向器的温度应在电机断能停转后立即测定,测定时宜采用时间常数较小的温度计(例如:半导体点温计)。

换向器、电刷或电刷装置的温升或温度不应损坏其本身或任何与其相邻部件的绝缘。

换向器的温升或温度不应超过由电刷等级和换向器材质组件在整个运行范围内能承受的电流的温升或温度值。

13.6.5 轴承

轴承温度可用温度计法或埋置检温计法进行测量。测量时,应保证检温计与被测部位之间有良好的热传递,滑动轴承或滚动轴承温度的测量应按 GB/T 755—2019 中 8.9 的规定进行。

13.7 断电停转后热电阻的确定

13.7.1 通用要求

热试验结束应迅速断电停机。应仔细地安排试验程序和适当数量的试验人员,尽快地测取电阻读数以获得可靠的数据。

13.7.2 短促停机时间

从断电瞬间算起,如在表 4 规定的时间间隔内读到了第一点热电阻读数 R_N ,则用此电阻值计算绕组温升。

表 4 时间间隔

额定输出 (P_N) kW	切断电源后的时间间隔 s
$P_N \leq 50$	30
$50 < P_N \leq 200$	90
$200 < P_N \leq 5\,000$	120
$5\,000 < P_N$	按协议

13.7.3 外推停机时间

如在表 4 规定时间范围内不能读出电阻的第一点读数,宜尽快地在表 4 规定时间间隔的 2 倍时间内读出读数,以后大约每隔 1 min 读取另外的电阻读数,直到这些读数已从最大值明显地下降为止。应把这些读数作为时间的函数绘制成曲线,并将曲线外推到表 4 中与电机额定输出对应的时间间隔,用此电阻值作为 R_N 。此时所得的温度值应作为停机后的绕组温度。宜采用半对数坐标,温度绘制在对数坐标尺上。如在停机后测得的连续数据显示出温度在升高,则应取最大热电阻值为 R_N 。

如不能在表 4 列出的 2 倍时间内读到第一点读数,则应协议确定最大延滞时间。

13.8 热试验方法

13.8.1 S1 工作制电机的热试验

13.8.1.1 通用要求

试验可从电机在实际冷态时开始,也可从热态开始。

试验过程中如有可能应测量机壳、并(他)励绕组、串励绕组、补偿绕组、换向极绕组、轴承、进出风和冷却介质的温度,至少每小时一次。

对采用强迫通风或闭路循环冷却系统的电机,在电机断能时同时停止冷却介质的供给。

恒转矩调速电动机的热试验,在最低额定转速及最高额定转速下按其相应的额定功率或按该类型电机标准的规定进行。

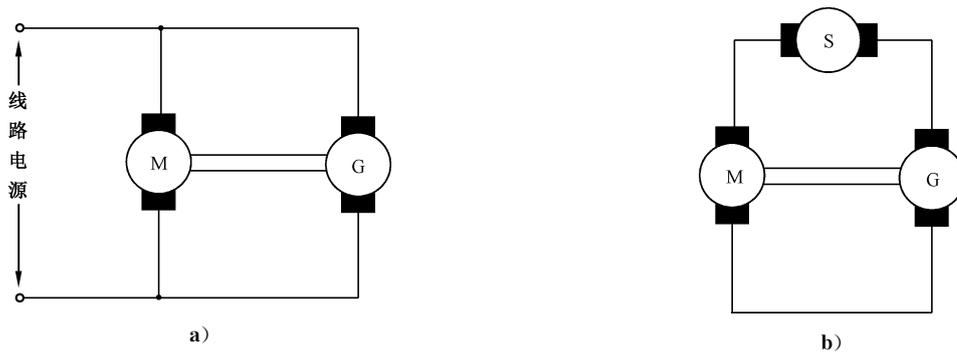
恒功率调速电动机的热试验,在最低额定转速下按其额定功率进行。

13.8.1.2 直接法

电机应在额定功率或铭牌电流、额定电压及额定转速下用直接负载法(见第 12 章)进行,直到电机各部分温升达到热稳定时为止。

对于小功率直流电动机,为了保持额定输出功率或转矩不变,一般应采用测功机等合适方式作负载进行热试验。热试验时所用支架和散热板应按该类型电机标准的规定。

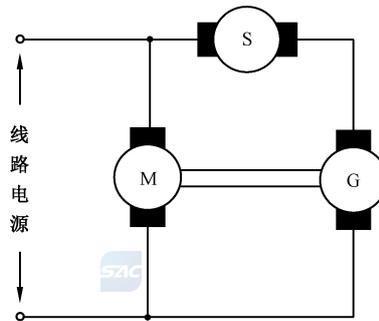
当试验电源为普通电源时,电机加负载的方法一般用回馈法,将被试电机与相应规格的另一台直流电机在机械上和电气上相互连接,其中一台电机作为电动机运行,而另一台则作为发电机运行。两台电机的损耗由线路电源或升压机供给,原理如图 11a)或图 11b)所示。两台电机的损耗也可由线路电源和升压机联合供给,见图 12。



标引序号说明：

- M——作为电动机的一台被试电机；
- G——作为发电机的一台被试电机；
- S——升压机。

图 11 损耗由线路电源或升压机单独供给的回馈法试验原理



标引序号说明：

- M ——作为电动机的一台被试电机；
- G ——作为发电机的一台被试电机；
- S ——升压机。

图 12 损耗由线路电源和升压机联合供给的回馈法试验原理

13.8.1.3 间接法

对于大中型电机，当受试验设备条件限制时，可采用间接法（空载短路法）进行热试验。此方法中被试直流电机由辅助电动机拖动到额定转速，辅助电动机的额定通常低于被试电机的 20%。做如下 3 项试验：

- a) m 试验：电枢绕组短路，调节励磁电流使电枢电流为额定值；
- b) n 试验：电枢绕组开路，调节励磁电流使电枢电压为额定内电势；
- c) o 试验：电枢绕组开路，零励磁电流。

对额定 1 000 kW 及以下的电机，进行 n 和 o 试验时，电刷应提起，但测量电枢电压时除外；对于额定大于 1 000 kW 的电机电刷可不提起，因为电刷的摩擦耗与其他损耗比数值较小。

第 3 项试验（o 试验）仅对转子表面线速度大于 30 m/s 的高速电机是必要的，因为风阻损耗对温升有明显的影响。

在试验过程中，如有可能应测量机壳、并（他）励绕组、串励绕组、换向极绕组、补偿绕组、轴承、进出风和冷却介质的温度，至少每小时一次，直到电机各部分温升达到热稳定为止。

电机断能后的要求同 13.7 的规定。

电机各部分绕组在额定负载时的温升 $\Delta\theta_N$ [单位为开尔文(K)] 等于电枢 I^2R 损耗和风摩擦、不计铁耗和励磁 I^2R 损耗产生的温升, 加上由铁耗、风摩擦(零电枢 I^2R 损耗)和额定励磁 I^2R 损耗产生的温升, 再减去由风摩擦产生的温升, 可按公式(18)求得:

$$\Delta\theta_N = \Delta\theta_m + \Delta\theta_n - \Delta\theta_o \quad \dots\dots\dots(18)$$

式中:

$\Delta\theta_m$ —— 额定电流时的短路温升, 单位为开尔文(K);

$\Delta\theta_n$ —— 电枢电压为额定负载时内电势值的空载温升, 单位为开尔文(K);

$\Delta\theta_o$ —— 不加励磁情况下的空转温升, 单位为开尔文(K)。

换向器温升由额定电流时的短路热试验即 m 试验求得。

13.8.1.4 非额定功率时温升的折算

电机的热试验如在铭牌电流下进行, 功率可能与额定功率略有不同。当 $\frac{I_N - I_t}{I_t} \times 100\%$ 不超过 $\pm 5\%$ 时试验所得的电枢回路绕组温升数值 $\Delta\theta$ [单位为开尔文(K)] 可由公式(19)换算到额定功率时的数值 $\Delta\theta_N$ [单位为开尔文(K)], 超过 $\pm 5\%$ 时应重新进行试验。

$$\Delta\theta_N = \Delta\theta \times \left(\frac{I_N}{I_t}\right)^2 \quad \dots\dots\dots(19)$$

式中:

$\Delta\theta$ —— 对应于试验电流 I_t 的绕组温升, 单位为开尔文(K);

I_N —— 电机额定输出功率时的电流, 单位为安培(A);

I_t —— 电机试验时电流, 取试验过程中最后 1 h 内几个相等时间间隔时的电流读数的平均值, 单位为安培(A)。

13.8.2 S2 工作制电机的热试验

试验的持续时间即为该定额所规定的时限。试验开始时, 电机应为实际冷态。

在试验过程中, 按照定额时间的长短每间隔 3 min~15 min 记录一次。

其他试验要求同 13.8.1 的规定。

13.8.3 周期工作制电机的热试验

通常采用制造商规定的等效负载定额进行试验, 直至达到热稳定。如协议按实际工作制试验, 则应按规定的负载周期连续运行, 直至达到实际上相同的温度循环。判断的准则是将两个相继工作周期的相应点连成直线, 其梯度应小于 1 K/0.5 h。如有必要, 应在一段时间内以适当的时间间隔进行测量。电机各部分温度的测定应在最后一个工作周期内, 产生最大热量时间一半时, 切断电源立即进行测量。

对于几个不同负载持续率的周期工作定额的电机, 其热试验应按每一负载持续率分别进行。对于他励电机, 如果设计中规定他励绕组在全部工作周期内是接在线路中, 则在断能停转时他励绕组不应自线路上断开。

其他试验要求同 13.8.1 的规定。

所谓等效负载定额, 是一种为试验目的而规定的定额, 按其规定在满足本文件各项要求的同时, 电机可在恒定负载下运行直至达到热稳定, 使定子绕组温升与在规定工作制的一个负载周期内的平均温升相同。等效定额的定义宜考虑一个工作周期内负载、转速和冷却的变化。如采用这类定额, 标志为“equ”。

14 效率的测定

14.1 通用要求

14.1.1 效率

效率是以同一单位表示的输出功率和输入功率之比,通常以百分数表示,可按公式(20)或公式(21)求取:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1 + P_{1E}} \dots\dots\dots(20)$$

$$\eta = \frac{P_1 + P_{1E} - P_T}{P_1 + P_{1E}} = \frac{P_2}{P_2 + P_T} \dots\dots\dots(21)$$

式中:

- P_2 ——输出功率,单位为瓦特(W);
- P_1 ——输入功率,励磁功率除外,单位为瓦特(W);
- P_{1E} ——独立电源供电的他励励磁功率,单位为瓦特(W);
- P_T ——总损耗,单位为瓦特(W)。

对于电动机,若应用于整流电源运行,输入功率 P_1 可由测量包括了交直流分量的电枢回路功率来确定。对于发电机,输入功率 P_1 可由输入机械功率来确定,输入机械功率可用转矩仪或测功机和转速表来测量。

14.1.2 直接法和间接法确定效率

确定效率的试验可归纳为下述 3 类:

- a) 直接测量单台电机的输入-输出功率,包括测量电机输入的电功率或机械功率和输出的电功率或机械功率;
- b) 对两台完全相同的对拖电机,直接测量其输入和输出电功率,可不必测量此两台电机之间的机械功率;
- c) 测量特定条件下电机的实际损耗,一般不是指总损耗而是包含了各部分损耗分量。

14.1.3 基准条件

除非另有规定,应确定额定电压和转速时的效率数据。对于调速电机,应采用基本转速。

效率计算中,确定 I^2R 损耗时,绕组电阻应修正到温度等于环境温度为 25 °C 加上用电阻法($t=0$)确定的额定负载温升。未测定额定负载下绕组温度时,则应按 5.4.2 确定。

若采用输入输出试验来确定效率,则宜尽可能按其定额规定的周期,在运行时所达到的最终温度下进行试验。

若数据是在标准条件(见 5.5.1)下采集的,除 I^2R 损耗外的其他损耗不需要对温度进行修正。

14.2 确定损耗和效率的试验方法

本文件规定的效率试验方法见表 5,这些试验方法可用于现场试验、客户特定协议试验或检查试验等。

表 5 效率试验方法

编号	方法	简述	章条号	设备需求
2-1-3A	直接测量,输入输出法	转矩测量	14.3	满载容量的测功机
2-1-3B	各项损耗求和,负载试验和由试验确定负载杂散损耗(P_{LL})的直流分量	单电源供电,对拖试验确定负载杂散损耗(P_{LL})的直流分量	14.4	升压发电机、特定整流器以及两台完全相同的电机
2-1-3C	各项损耗求和,负载试验和由推荐值确定负载杂散损耗(P_{LL})的直流分量	按推荐值确定负载杂散损耗(P_{LL})的直流分量	14.5	特定整流器
2-1-3D	不进行负载试验的各项损耗求和	根据负载励磁电流对空载励磁电流的比例推荐值确定负载励磁电流再计算确定励磁绕组损耗;按推荐值确定负载杂散损耗(P_{LL})	14.6	—
2-1-3E	单电源供电对拖试验	单电源供电,对拖试验	14.7	升压发电机以及两台完全相同的电机

14.3 方法 2-1-3A:直接测量输入输出法

14.3.1 概述

本试验方法测取电机轴端的转矩和转速以确定其机械功率 P_{mech} ,试验中同时测取其定子的电功率 P_{el} ,见图 13。

输入功率 P_1 和输出功率 P_2 按公式(22)、公式(23)或公式(24)、公式(25)确定。

电动机运行时:

$$P_1 = P_{el} \quad \dots\dots\dots(22)$$

$$P_2 = P_{mech} \quad \dots\dots\dots(23)$$

发电机运行时:

$$P_1 = P_{mech} \quad \dots\dots\dots(24)$$

$$P_2 = P_{el} \quad \dots\dots\dots(25)$$

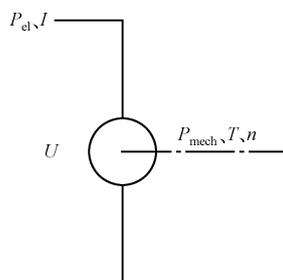


图 13 直接测量输入输出法试验原理图

14.3.2 试验程序

按第 12 章进行负载试验,将被试电动机连接在负载机上,或将被试发电机通过转矩仪连接在驱动电动机上,施加需要的负载并记录: U 、 I 、 P_{el} 、 n 、 T 、 θ_c 。

试验后立即测定并(他)励及电枢绕组电阻。

对由轴带的、独立旋转的、静止的和辅助绕组励磁机励磁的电机,当需要励磁数据时,可在励磁绕组出线端测量电压 U_e 和电流 I_e 。

14.3.3 确定效率

效率按公式(26)计算:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1 + P_{1E}} \dots\dots\dots(26)$$

输入功率 P_1 和输出功率 P_2 如下:

——以电动机运行: $P_1 = P_{el}$, $P_2 = P_{mech}$;

——以发电机运行: $P_1 = P_{mech}$, $P_2 = P_{el}$ 。

式中 P_{mech} 按公式(27)计算:

$$P_{mech} = 2 \times \pi \times T \times \frac{n}{60} \dots\dots\dots(27)$$

转矩 T 为实际转矩值,按 14.3.2 测取并按附录 B 修正。

P_{1E} 为独立电源供电的他励励磁功率,单位为瓦特(W),可在励磁绕组出线端测量电压 U 和电流 I 来确定。

注:非 P_{1E} 提供的励磁损耗包含在轴机械输入中。

14.3.4 效率的温度折算

用输入输出法直接法测定电机效率时,如试验时的冷却介质温度不是 25 °C,应按下述方法对测得的电功率 P_{el} 进行折算,折算后确定的效率标记为 η_{25} 。

被试电机以电动机运行或以发电机运行时的电功率应分别按公式(28)或公式(29)折算:

$$P_{el(25)} = P_{el} + I^2 \times R_a \times (k_{\theta} - 1) + I_e^2 \times R_f \times (k_{\theta f} - 1) \dots\dots\dots(28)$$

$$P_{el(25)} = P_{el} - I^2 \times R_a \times (k_{\theta} - 1) - I_e^2 \times R_f \times (k_{\theta f} - 1) \dots\dots\dots(29)$$

式中:

P_{el} ——按 14.3.2 测得的电功率,单位为瓦特(W);

I ——按 14.3.2 测得的电枢电流,单位为安培(A);

R_a ——额定负载热试验测得的电枢绕组电阻,单位为欧姆(Ω);

k_{θ} ——电枢绕组电阻的温度修正系数,按 5.4.3 确定;

I_e ——按 14.3.2 测得的励磁电流,单位为安培(A);

R_f ——额定负载热试验测得的励磁绕组电阻,单位为欧姆(Ω);

$k_{\theta f}$ ——励磁绕组电阻的温度修正系数,按 5.4.3 确定。

14.4 方法 2-1-3B:各项损耗求和,负载试验和试验确定负载杂散损耗的直流分量

14.4.1 概述

本试验方法是通过各项损耗求和确定电机效率。各分项损耗如下:

——铁耗;

- 风摩擦；
- 电枢绕组和电刷电损耗；
- 励磁绕组和励磁机损耗；
- 负载杂散损耗。

14.4.2 试验程序

14.4.2.1 负载试验

额定负载热试验的试验方法与电枢回路绕组损耗、电刷电损耗、励磁绕组损耗和励磁机损耗的计算如下所示。

a) 额定负载热试验

负载试验开始前,在环境温度下测量被试验电机的绕组电阻和温度。

按第 12 章所述,进行额定负载试验,在额定负载试验最后,记录至少 3 组试验结果的平均值:

P_N 、 U_N 、 I_N 、 θ_c 及 θ_w 。

上述数据中:

$R_N=R$ ——按 5.4.1 确定的额定负载绕组电阻,单位为欧姆(Ω);

θ_w ——按 5.4.2 确定的额定负载绕组温度,单位为摄氏度($^{\circ}\text{C}$)。

对由轴带的、独立旋转的、静止的和辅助绕组励磁机励磁的电机,应在其励磁绕组出线端测量电压 U_e 和电流 I_e 。

由整流电源供电的情况下,应测量电流的平均值 I_{av} 和有效值 I 。

上述 R 是流过电枢电流的所有绕组(电枢绕组、换向极绕组、补偿绕组和复励绕组)的总电阻值。如果由于电阻过小无法测量时,可用计算值。

b) 电枢回路绕组损耗 P_a

对每个负载点记录的数据,按公式(30)确定电枢回路绕组损耗:

$$P_a = I^2 \times R \quad \dots\dots\dots(30)$$

式中:

R ——按 5.4.1 确定的电枢回路所有绕组的总电阻值,并修正到冷却介质为 25°C ,单位为欧姆(Ω)。

c) 电刷电损耗 P_b

用指定的每刷电压降确定电刷电损耗,按公式(31)确定:

$$P_b = 2 \times U_b \times I \quad \dots\dots\dots(31)$$

式中:

I ——在额定条件下的电枢电流,单位为安培(A);

U_b ——根据电刷类型假定的每刷电压降,单位为伏特(V),其中:

- 1.0 V ——炭质、电石墨或石墨电刷;
- 0.3 V ——金属炭质混合电刷。

d) 励磁绕组损耗 P_f

励磁绕组损耗由测得的电压和电流按公式(32)确定:

$$P_f = U_e \times I_e \quad \dots\dots\dots(32)$$

注:主励磁回路中变阻器损耗为指定负载时变阻器的电阻数值与在该负载时的励磁电流平方的乘积,或者指定为负载时变阻器上的电压降与该负载时励磁电流的乘积。

e) 励磁机损耗 P_{Ed}

由被试电机驱动并为其专用的励磁机,其损耗应计入被试电机的励磁损耗内。此项损耗为励

磁机的输入功率(除励磁机本身的机械损耗外)与励磁机输出功率间的差值加上励磁机的励磁损耗(如励磁机为他励时)。励磁机的输出功率即为上述 d)项(包括主励磁回路中变阻器损耗)。

如励磁机可从被试电机轴上拆下而单独进行试验时,则励磁机在指定输出时的输入功率可用测功机或转矩测量仪来测定;如励磁机不能拆下时,则可将被试电机由独立的电源他励,在电动机状态下运行,测定励磁机在负载及空载不励磁时整个机组的损耗,两个损耗的差值即为励磁机的输入功率。

如上述方法都不能应用时,则励磁机损耗可用本条所述的损耗分析法确定,但已计入在被试电机中的机械损耗不应计入。

将励磁机与主机分离(如果可能),然后把励磁机连接至:

- 转矩测量设备,按输入输出法确定输入机械功率,或
- 校准过的驱动电动机,测量电动机输入电功率。

将励磁机接到合适的阻性负载上。在额定负载时的电压 U_e 和电流 I_e 下无励磁运行励磁机。

记录:

——每个负载点的 U_e 、 I_e 、 P_{1E} 、 n 、 T_E (P_{1E} 为独立电源供电的他励励磁功率,可在励磁绕组出线端测量电压 U 和电流 I 来确定);

—— $T_{E,0}$,励磁机无励磁时的转矩,单位为牛顿米(N·m)。

励磁机损耗按公式(33)计算:

$$P_{Ed} = 2 \times \pi \times \frac{n}{60} \times (T_E - T_{E,0}) + P_{1E} - P_f \quad \dots\dots\dots(33)$$

试验无法进行时,应用损耗计算值或由制造商提供。

14.4.2.2 空载试验

按第 10 章所述,进行空载试验,并记录数据。

a) 空载电动机法确定铁耗及风摩擦

1) 恒定损耗 P_c

按公式(34)确定恒定损耗:

$$P_c = P_0 - P_a - P_{b0} \quad \dots\dots\dots(34)$$

式中:

P_0 ——空载时电枢输入功率(等于空载时电枢输入电压和电流的乘积),单位为瓦特(W);

P_a ——电枢回路绕组 I^2R 损耗,单位为瓦特(W),按公式(35)计算;

P_{b0} ——空载电刷电损耗,等于空载电流与每电刷压降乘积的 2 倍,单位为瓦特(W)。

$$P_a = I_0^2 \times R_0 \quad \dots\dots\dots(35)$$

式中:

I_0 和 R_0 ——对应试验中每一个电压的电流和电阻。

当由于电阻过小无法测量时,可采用计算值,并修正到预期的绕组温度。

注:在电枢损耗 P_a 中,包括下列部分:补偿绕组、换向极绕组和并联电阻器(分流器)。如果分流器与串励绕组并联,绕组电损耗用总电流和合成电阻确定。

2) 风摩擦 P_{fw}

对 70% 及以下的电压点,做恒定损耗 P_c 对电压平方 $(U_0)^2$ 的关系曲线,外推直线至零电压。零电压时轴上的纵轴截距即为风摩擦 P_{fw} ,见图 14。

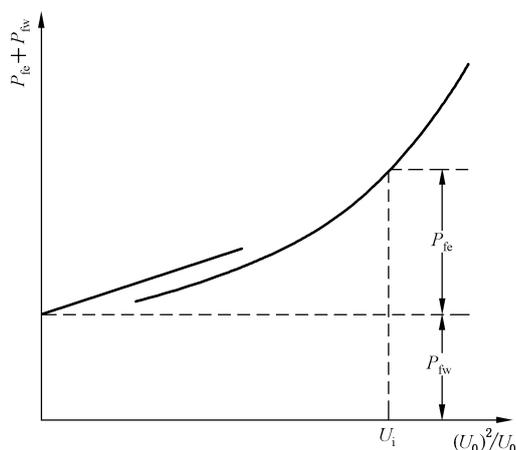


图 14 风摩耗和铁耗的确定

3) 铁耗 P_{fe}

对 80%~110% 之间电压点, 作恒定损耗 P_c 对电压 U_0 的关系曲线。被试电机的铁耗应按相应的感应电势 U_i 求得, U_i 按公式(36)或公式(37)计算。

对电动机:

$$U_i = U_N - (I \times R)_a - 2 \times U_b \quad \dots\dots\dots(36)$$

对发电机:

$$U_i = U_N + (I \times R)_a + 2 \times U_b \quad \dots\dots\dots(37)$$

式中:

U_N —— 额定电压, 单位为伏特(V);

$2U_b$ —— 负载试验中得到的电刷压降, 单位为伏特(V);

I —— 需要的负载点的电流, 单位为安培(A);

R —— 在额定负载热试验时的电枢回路总电阻, 单位为欧姆(Ω)。

铁耗按公式(38)确定:

$$P_{fe} = P_c - P_{fw} \quad \dots\dots\dots(38)$$

b) 空载发电机法确定铁耗和风摩耗

按第 10 章发电机法进行空载试验。试验时, 被试电机应他励, 转速应保持在额定值, 被试电机的空载电枢电压调节到等于被试电机在额定运行时的感应电势 U_i , 按公式(36)或公式(37)确定, 此时测功机或转矩测量仪测得的功率即为被试电机的铁耗与风摩耗之和($P_{fe} + P_{fw}$)。再使被试电机在空载不励磁情况下运行, 此时测功机或转矩测量仪测得的功率即为风摩耗 P_{fw} 。上述两个损耗间的差值即为被试电机的铁耗 P_{fe} 。

14.4.3 负载杂散损耗

14.4.3.1 概述

负载杂散损耗是指电机中由负载所引起的未包含在铁耗、风摩耗、电枢绕组和电刷电损耗、励磁绕组和励磁机损耗的任意一种损耗里的附加损耗, 这些损耗分为两类:

- a) 由电枢电流的直流分量所引起的负载杂散损耗;
- b) 对于整流电源供电, 由于整流器运行所引起的附加负载杂散损耗。

14.4.3.2 直流分量按单电源对拖试验确定

有两台完全相同的直流电机可用时,本试验可测定负载杂散损耗的直流分量。两台电机机械对接且电气连接在一起,由同一个直流电源供电,以发电机运行的电机应串接升压机,见图 15。

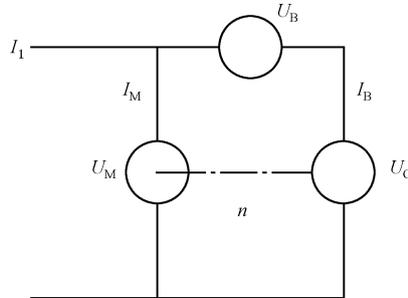


图 15 直流电机单电源对拖试验确定负载杂散损耗的直流分量

如电机设计为电动机运行,则电源应提供额定电压和额定电流使被试电机作为电动机运行。如电机设计为发电机运行,则电源应调节至额定电压和额定电流使被试电机作为发电机运行。两台电机运行时的磁通量应能产生对应负载试验的感应电势(e.m.f.)。

注:电源主要提供的是空载损耗,升压机承担主要负载损耗。

对有轴带励磁机的电机,该电机宜他励,且励磁机与电源和励磁绕组分离。

当温度稳定时,记录:U、I、UB、IB、Ue,M、Ie,M、Ue,G、Ie,G、n、θc。

负载杂散损耗的直流分量按公式(39)计算:

$$P_{LL} = \frac{1}{2} \times [P_1 - \sum P_c - \sum P_a - P_{con} - 2 \times U_b \times (I + I_B) - 2 \times I_B \times U_b] \dots\dots\dots (39)$$

式中:

P₁ ——由电源和升压机供给的功率,单位为瓦特(W), P₁ = U_M × I₁ + U_B × I_B;

∑P_c ——两台电机恒定损耗之和,单位为瓦特(W);

∑P_a ——两台电机电枢回路的电阻损耗之和,单位为瓦特(W);

P_{con} ——连接线路损耗,单位为瓦特(W)。

对其他负载点的损耗可按表 6 中规定的系数确定。

14.4.3.3 直流分量按测功机负载试验确定

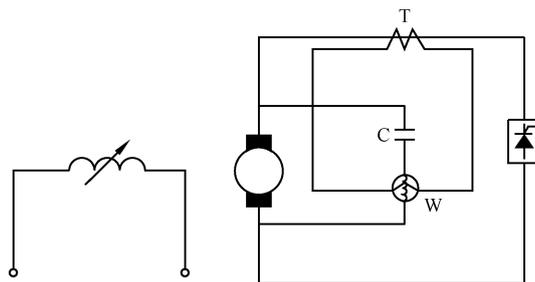
对于用测功机、转矩仪等进行额定负载试验的电机,按附录 D 规定的方法由测功机试验确定负载杂散损耗的直流分量。

14.4.3.4 交流分量(整流电源供电)

对于由整流电源供电的电动机,凡是电枢电流的电流纹波因数超过 0.1,除上述规定的杂散损耗直流分量外,还应计入由电枢电流交流分量产生的杂散损耗。

在电枢回路里最好串入空心电流互感器。如用带有铁芯的互感器,互感器应有足够容量,以避免直流电流通过互感器一次绕组而引起的磁饱和。互感器二次绕组串联于低功率因数瓦特表电流线圈中;同时将用以隔离电压直流分量的电容器同低功率因数瓦特表的电压线圈串联后,跨接在电枢的两端。电容器应有适当容量,以使电容器两端的交流压降不大于被测电压交流分量的 2%。由低功率因数瓦特表读取的交流输入功率,即为电动机的纹波损耗,见图 16。

为得到比较准确的试验结果,所用仪表和元器件的工作频率应在 360 Hz 以上。



标引序号说明:

- T —— 电流互感器;
- C —— 隔直电容器;
- W —— 低功率因数瓦特表。

图 16 整流电源供电时确定负载杂散损耗的交流分量

记录:

- P_1 —— 供给电机的交流功率,单位为瓦特(W);
- I_{ac} —— 电流交流分量有效值,单位为安培(A);
- θ_w —— 电枢回路的绕组温度,单位为摄氏度($^{\circ}\text{C}$),见 5.4.2。

注:对串励电动机,少量的交流输入功率有助于提高电动机的转矩,这部分功率通常很小,忽略不计。

由电源电压交流分量引起的杂散损耗按公式(40)计算:

$$P_{LL} = P_1 - I_{ac}^2 \times R_a \quad \dots\dots\dots(40)$$

式中:

R_a —— 额定负载热试验时的电枢回路电阻,单位为欧姆(Ω),见 5.4.1。

14.4.4 确定效率

效率按公式(41)计算:

$$\eta = \frac{P_1 + P_{1E} - P_T}{P_1 + P_{1E}} = \frac{P_2}{P_2 + P_T} \quad \dots\dots\dots(41)$$

式中:

- P_1 —— 输入功率,不包括他励电源供给的励磁功率,单位为瓦特(W);
- P_2 —— 输出功率,单位为瓦特(W);
- P_{1E} —— 由他励电源供给的励磁功率,单位为瓦特(W)。

注:适用时, P_T 包括电机的励磁回路损耗 P_e 。

总损耗应是各分项损耗相加,按公式(42)计算:

$$P_T = P_a + P_b + P_c + P_{LL} + P_e \quad \dots\dots\dots(42)$$

式中:

- P_a —— 电枢绕组损耗,单位为瓦特(W);
- P_b —— 电刷电损耗,单位为瓦特(W);
- P_c —— 恒定损耗,单位为瓦特(W);
- P_{LL} —— 负载杂散损耗,单位为瓦特(W);
- P_e —— 励磁回路损耗,单位为瓦特(W),按公式(43)计算。

$$P_e = P_f + P_{Ed} \quad \dots\dots\dots(43)$$

式中：

P_f ——励磁绕组损耗,单位为瓦特(W)；

P_{Ed} ——励磁机损耗,单位为瓦特(W)。

14.5 方法 2-1-3C:各项损耗求和,负载试验和推荐值确定负载杂散损耗的直流分量

14.5.1 概述

如同方法 2-1-3B,本方法采用各项损耗求和确定电机效率,各分项损耗如下：

- 铁耗；
- 风摩耗；
- 电枢绕组和电刷电损耗；
- 励磁绕组和励磁机损耗；
- 负载杂散损耗。

14.5.2 试验程序

除了负载杂散损耗的直流分量的确定不同以外,按 14.4 的同样程序进行。

按推荐值确定负载杂散损耗的直流分量。

假定杂散损耗的直流分量与电流的平方成正比,在最大额定电流时其总值按 a)或 b)确定。

a) 对无补偿绕组的电机：

- 对电动机,为额定输入功率的 1%；
- 对发电机,为额定输出功率的 1%。

b) 对有补偿绕组的电机：

- 对电动机,为额定输入功率的 0.5%；
- 对发电机,为额定输出功率的 0.5%。

对恒速电机,额定功率是最大额定电流和最大额定电压时的功率。

对通过调节供电电压改变转速的调速电动机,额定输入功率是每一特定转速下对应于最大额定电流及相应电压时的输入功率。

对借调节外施电压改变转速的调速电动机,每一特定转速时的额定输入是指最大额定电流与该特定转速时的电压乘积。对借励磁改变转速的调速电动机,额定输入是指额定电压与最大额定电流的乘积。对借励磁保持恒压的调速发电机,额定输出是指额定电压与最大额定电流时的输出。上述 a)或 b)中的百分数是指在最低额定转速时的杂散损耗。在其他转速时,应再乘以表 6 的校正系数。

表 6 不同转速比的校正系数

转速比	校正系数
1.5 : 1	1.4
2 : 1	1.7
3 : 1	2.5
4 : 1	3.2

注：转速比是指某一实际转速与连续运行的最低额定转速之比。对于未列出的转速比,其相应的校正系数用插值法求取。

14.5.3 确定效率

按 14.5.2 试验程序,确定各项损耗,效率值的计算按 14.4.4 的规定。

14.6 方法 2-1-3D:无负载试验的各项损耗求和

14.6.1 概述

如同方法 2-1-3C,本方法采用各项损耗求和确定效率,但其中电枢回路绕组损耗和励磁绕组损耗不是通过负载试验确定,而是利用计算值。

14.6.2 试验程序

除了电枢回路绕组损耗和励磁绕组损耗的确定不同以外,按 14.5 的同样程序进行,其中负载杂散损耗的直流分量采用推荐值法确定。

如不进行负载试验,电枢回路绕组损耗 P_a 应按 $I_a^2 \times R$ 计算, R 是按 5.4.1 确定的电枢回路所有绕组的总电阻值,并修正到 5.4.3 规定的基准温度,单位为欧姆(Ω)。

如不进行负载试验,励磁绕组损耗 P_f 应按 $I_e^2 \times R_f$ 计算,式中 R_f 是并励绕组(或其他励磁绕组)的电阻,并修正到 5.4.3 规定的基准温度, I_e 是按以下所列不同情况确定的励磁电流:

- 对并励或他励发电机(不论有无换向极)按电机空载电压等于额定电压加上额定电流时电枢回路(包括电枢绕组、电刷、换向极绕组)的压降所需励磁电流的 110%;
- 对带有补偿绕组的并励或他励发电机,按电机在空载电压等于额定电压加上额定电流时电枢回路(包括电枢绕组、换向极绕组、补偿绕组及电刷)电压降时的励磁电流;
- 对平复励发电机,取空载电压等于额定电压时的励磁电流;
- 对过复励及欠复励发电机以及不包括在 a)~c)中的特殊类型发电机,由制造厂与用户协议;
- 对他励电动机,取额定电压、额定转速时的空载励磁电流。

14.6.3 确定效率

按 14.6.2 试验程序,确定各项损耗,效率值的计算按 14.4.4 的规定。

14.7 方法 2-1-3E:单电源对拖试验

14.7.1 概述

本方法试验电源用普通电源,由单电源回馈试验测定总损耗。

14.7.2 试验程序

两台完全相同的电机机械耦合且电气连接在一起,由同一个直流电源供电运行在额定电压和额定转速,一台作为电动机运行,另一台作为发电机运行,见图 17。

电源主要提供的是空载损耗,升压机主要承担负载损耗。

注:或者,负载损耗由一台校准过的驱动电机、一台升压机提供,或是由这些不同的方式组合供给。

电机各部分的温度应接近热稳定,两台电机应由独立的直流电源他励,应调节励磁电流使电机在额定转速时满足下列要求:

- 两台电机电枢电流的平均值应等于电机在额定运行时的电枢电流;
- 两台电机的电枢感应电势应等于电机在额定运行时的电枢感应电势,电枢回路中的电压降由升压机补偿。

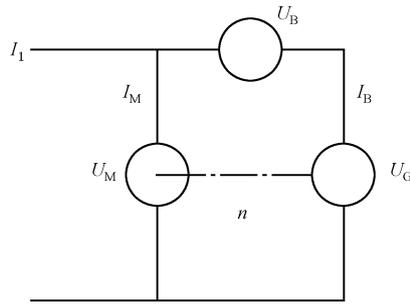


图 17 直流电机单电源对拖试验原理图

如果没有升压机可用,宜调节公共端的电压,使两台电机的电流平均值为额定电流。

对每次试验,记录:

- 电源的 U_M 、 I_1 ;
- 在电动机端吸收的 P_M ;
- 升压机的 U_B 、 I_B ;
- n 、 θ_c 。

励磁绕组功率,可在励磁绕组出线端测量电压和电流($U_{e,M}$ 、 $I_{e,M}$ 、 $U_{e,G}$ 、 $I_{e,G}$)来确定。

14.7.3 确定效率

当两台完全相同的电机在基本额定工况运行时,每台电机各占总损耗的一半,电动机的效率按公式(44)计算、发电机效率按公式(45)计算:

$$\eta = \frac{P_1 + P_{1E} - P_T}{P_1 + P_{1E}} = 1 - \frac{P_T}{P_M + P_{1E}} \quad \dots\dots\dots(44)$$

$$\eta = \frac{P_2}{P_2 + P_T} = 1 - \frac{P_T}{P_G + P_T} \quad \dots\dots\dots(45)$$

式中:

- P_M ——作电动机运行的电机端子处吸收功率(励磁功率除外),单位为瓦特(W);
- P_G ——作发电机运行的电机端子处输出功率(励磁功率除外),单位为瓦特(W);
- P_T ——总损耗,规定为总吸收功率的一半,见公式(46),单位为瓦特(W);
- P_{1E} ——由他励电源提供的励磁功率,见公式(47),单位为瓦特(W)。

注:两台电机的总损耗等于损耗电源和升压发电机提供的功率加上所使用的所有单独励磁的损耗,若可能,再减去用于连接电机的电缆、母线、开关及断路器等损耗。

$$P_T = \frac{1}{2} \times (U_M \times I_1 + U_B \times I_B) + P_{1E} \quad \dots\dots\dots(46)$$

$$P_{1E} = \frac{1}{2} \times (P_{1E,M} + P_{1E,G}) \quad \dots\dots\dots(47)$$

15 调整试验

15.1 电动机的转速特性和固有转速调整率的测定

15.1.1 通用要求

本试验的目的是确定当励磁不变、负载从额定到空载均匀变化时,电动机转速的变化。电动机可用整流电源、直流母线或其他直流电源供电。

被试电机应额定运行于热稳定,保持额定电压,对于他励或并励电机,保持励磁电流不变;对于复励电机,应保持励磁调节不变。逐步减少及增加负载电流,反复进行若干次,直到额定电流下转速相近为止。

15.1.2 电动机转速特性的测定

电动机转速特性的试验可按下列方法之一:

- a) 电机由额定负载和额定转速开始,逐步减少到空载(对不允许空载的电动机,减少到 1/4 额定负载),然后逐步增加负载电流,每隔约 25% 额定电流读数,直至 1.2 倍~1.5 倍额定负载;
- b) 电机由额定负载和额定转速开始,逐步增加到 1.2 倍~1.5 倍额定负载,然后逐步减少到空载(对不允许空载的电动机,减少到 1/4 额定负载),每隔约 25% 额定电流读数。

试验过程中,如在额定电流时的转速与开始值有明显差异时,则应重新进行试验。试验时应同时读取转速、负载电流、励磁电流和电枢电压的数值,并绘制转速对于负载电流的关系曲线。

15.1.3 电动机固有转速调整率的测定

固有转速调整率的测定方法同 15.1.2 的规定。在检查试验中,可只在满载及空载(对不允许空载的电动机,减少到 1/4 额定负载)时读取两点读数。

可逆转的电动机,应在每个旋转方向测定固有转速调整率。

调速电动机应在最低额定转速及最高额定转速时测定固有转速调整率。

固有转速调整率按公式(48)计算:

$$\Delta n_N = \frac{n_0 - n_N}{n_N} \times 100\% \quad \dots\dots\dots(48)$$

式中:

Δn_N —— 固有转速调整率;

n_0 —— 空载时的转速,单位为转每分(r/min);

n_N —— 额定负载时的转速,单位为转每分(r/min)。

15.2 发电机的外特性和固有电压调整率的测定

15.2.1 通用要求

本试验的目的是确定发电机励磁保持不变时终端电压随着额定电枢电流的逐渐消除而导致的变化。

被试电机应额定运行于热稳定,保持额定转速及励磁调节不变(对他励电机保持励磁电流不变),逐步减少及增加负载电流,反复进行若干次,直到额定电流下电压相近为止。

15.2.2 发电机外特性的测定

发电机外特性的试验方法可按下列方法之一:

- a) 电机从额定负载开始,逐步减少负载电流到空载,然后逐步增加负载,每隔约 25% 额定负载读数,直至 1.2 倍~1.5 倍额定负载;
- b) 电机从额定负载开始,逐步增加负载到 1.2 倍~1.5 倍额定负载;逐步减小负载,每隔约 25% 额定负载读数,直至空载。

试验过程中,若在额定电流时的电压读数与开始值有明显差异时,应重新进行试验。试验时,应同时读取电枢电压、负载电流、励磁电流和转速的数值,并绘制电压对负载电流的关系曲线。

15.2.3 固有电压调整率的测定

固有电压调整率的测定方法同 15.2.2。在检查试验中,可只在满载及空载时读取两点读数。
固有电压调整率按公式(49)计算:

$$\Delta U_N = \frac{U_0 - U_N}{U_N} \times 100\% \quad \dots\dots\dots (49)$$

式中:

- ΔU_N ——固有电压调整率;
 - U_0 ——空载时的端电压,单位为伏特(V);
 - U_N ——额定负载时的端电压,单位为伏特(V)。
- 需要时,可获取更完整的端电压对负载的试验数据。

15.3 发电机和原动机组合的电压调整率

15.2 中给出的试验程序适用于固有电压调整率。发电机和原动机组合的电压调整率采用与 15.2 相同的试验方法,但其速度对负载的特性包括了发电机的原动机。发电机应在额定负载下以额定转速驱动,所有其他点的速度应来自发电机原动机的固有速度-负载特性。若不知道准确的速度-负载特性,则应假定其在整个负载范围内为线性函数。

16 转动惯量的测定

16.1 概述

- 直流电机转动惯量测定方法有 3 种:
- 自减速法,用于安装完整的电机特别是大型电机;
 - 悬挂扭摆法,用于单独测试电枢;
 - 辅助摆锤法,用于测定具有滚动轴承电机的转动惯量。

16.2 自减速法

首先测定电机在额定转速时的空载铁耗和机械损耗。在额定励磁电流和高于额定转速 n_N 下,作空载运行(串励电机在他励情况下),待电机运行平稳后迅速地切断电枢电源,励磁电流保持不变,由其惯性而自然减速,宜用 x-y 记录仪测定其减速曲线,见图 18,在 1.1 倍~0.9 倍额定转速范围内进行计算。

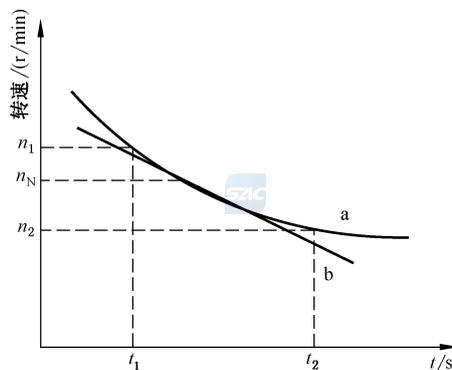


图 18 空载自减速曲线

转动惯量 J 按公式(50)计算:

$$J = \frac{P}{4 \times 1.37 \times [(n_1^2 - n_2^2)/(t_2 - t_1)]} \times 10^6 \quad \dots\dots\dots(50)$$

式中:

J ——转动惯量,单位为千克二次方米($\text{kg} \cdot \text{m}^2$);

P ——在额定转速时的风摩擦耗和铁耗之和,单位为千瓦(kW);

n_1 ——时间 t_1 时的转速,单位为转每分(r/min);

n_2 ——时间 t_2 时的转速,单位为转每分(r/min)。

另外,在空载自减速曲线 a 上,由转速 n_N 点引起切线 b,求出 n_N 处的速度变化率 dn_N/dt [单位为转每分每秒(r/min)/s]。

转动惯量 J 按公式(51)计算:

$$J = \frac{P \times 10^6}{4 \times 2.74 \times (dn_N/dt) \times n_N} \quad \dots\dots\dots(51)$$

16.3 悬挂扭摆法

16.3.1 单钢丝法

采用单钢丝扭转摆动比较法测定电机转子的转动惯量。

选择密度均匀的金属制成假转子,假转子形状应为简单的圆柱体,以便能较精确地计算出假转子的转动惯量。假转子的质量应能将所选用的钢丝拉直且钢丝不变形。把假转子可靠地悬挂在长度 $l \geq 0.5\text{m}$ 的钢丝一端,钢丝的另一端固定在支架上,钢丝轴线应与假转子轴线同心且垂直地面。

将假转子绕心轴扭转一个适当角度,仔细测量往复摆动次数 N 及所需时间 t (s),求得摆动周期平均值 T' ($T' = N/t$)。被试电机转子在相同的条件下,重复上述试验,按以上方法求得其摆动周期的平均值 T ,则可用比较法确定被试电机的转动惯量 J 。

假转子的转动惯量 J' 由公式(52)计算:

$$J' = \frac{m \times D^2}{8} \quad \dots\dots\dots(52)$$

式中:

D ——圆柱体直径,单位为米(m);

m ——直径 D 部分的圆柱体质量,单位为千克(kg)。

被试电机转子的转动惯量 J 按公式(53)计算:

$$J = J' \times \frac{T^2}{T'^2} \quad \dots\dots\dots(53)$$

式中:

T ——被试电机转子的摆动周期平均值,单位为秒(s);

T' ——假转子的摆动周期平均值,单位为秒(s)。

16.3.2 双钢丝法

用两根平行的钢丝将被试电机转子悬挂起来,使其转轴中心线与地面垂直,见图 19。扭转转子使其产生以轴线为中心的摆动。转轴中心线的扭角不应大于 10° 。仔细测取若干次摆动所需的时间,求出摆动周期的平均值 T 。

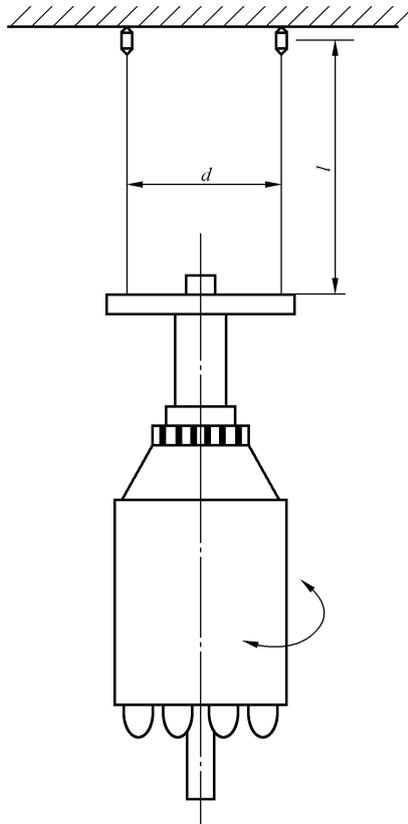


图 19 双钢丝扭摆法确定转动惯量

转动惯量 J 按公式(54)求取：

$$J = \frac{T^2 \times d^2}{l} \times \frac{m \times g}{(4 \times \pi)^2} \dots\dots\dots (54)$$

式中：

- g ——重力加速度,单位为米每二次方秒(m/s^2)；
- d ——两钢丝之间的距离,单位为米(m)；
- l ——钢丝的长度,单位为米(m)；
- m ——被试电机转子的质量,单位为千克(kg)。



16.4 辅助摆锤法

试验应在电刷全部提起时进行。

将一个质量已知的辅助摆锤用质量尽可能小的臂杆固定于被试电机转轴端面中心上,摆锤臂杆应与轴线成直角。当转子转轴上带有皮带轮或半个联轴器时,也可用它们来固定摆锤。

试验时,摆锤的初始位置与静止位置偏移不应大于 15° ,然后开始摆动,并在其后测量 2 次~3 次摆动所需的时间,求出摆动周期的平均值,以摆锤通过静止位置的瞬间作为测量摆动周期的起始点。

转动惯量 J 按公式(55)求取：

$$J = m \times r \times \left(\frac{T^2 \times g}{4 \times \pi^2} - r \right) \dots\dots\dots (55)$$

式中：

- m ——辅助摆锤的质量,单位为千克(kg)；
- r ——辅助摆锤的重心到转轴中心线的距离,单位为米(m)；

T ——辅助摆锤摆动周期的平均值,单位为秒(s)。

对功率为 10 kW~1 000 kW 的电机,选用辅助摆锤时,应使摆动周期为 3 s~8 s。为了校核,建议在摆锤质量略有不同的情况下重复进行测定。

17 无火花换向区域的测定

17.1 通则

无火花换向区试验目的是确定超前或滞后换向的极限值,在此极限值之间负载电流从空载电流直到不小于额定电流的范围内可得到无火花换向。为改变交轴磁通强度,把一台辅助低电压发电机并联于换向极绕组(和补偿绕组,如有),见图 20。

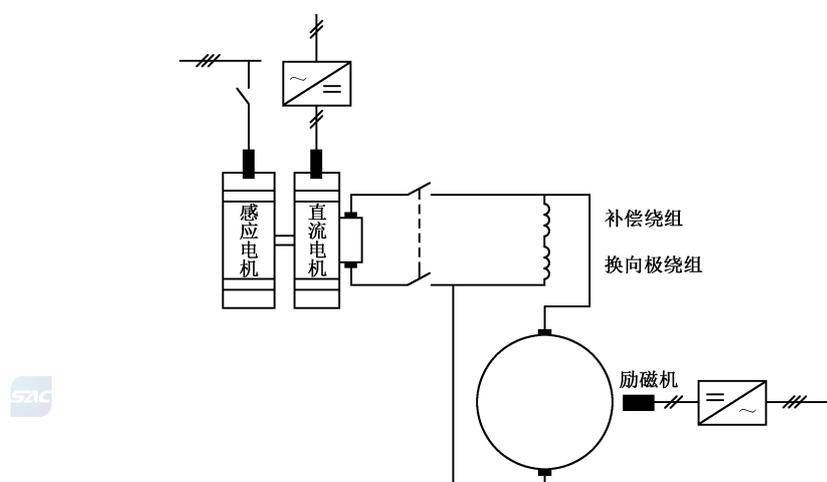


图 20 无火花换向区域试验线路

无火花换向区域试验适用于带换向极的电机,应在额定基速下和最高额定转速下(如可行的话)进行试验。试验宜尽可能在负载状态下进行,对于额定功率 500 kW 及以上的电机,可在作为发电机运行并短路的状态下试验;如在电动机状态下试验,则应采用平滑电流电源供电。

在短路情况下进行试验的时候,应调节能接近零的励磁电流并观察电枢电流升至额定值的整个过程,因为很小的励磁电流增加都可导致电枢电流失控。

17.2 试验准备

为尽可能得到可靠结果,电机宜在热稳定状态下进行试验。试验前确保所有电刷和换向器接触良好。

无火花换向区域试验最好使用纯正的直流电源给电枢供电,如无条件,用整流电源供电时,或许需要在电枢电源中串接一合适的电感。

如果换向极绕组和补偿绕组(如有)是串联连接在一起,应按图 20 接入一台辅助发电机。图 20 说明的是短路状态。

如换向极绕组和(或)补偿绕组均分开,且分别和电枢绕组两边相连,则换向电流变化将受到电枢绕组影响,可用一台辅助发电机与被试电机电刷直接相连,用以增大或减小电枢电流,见图 21。

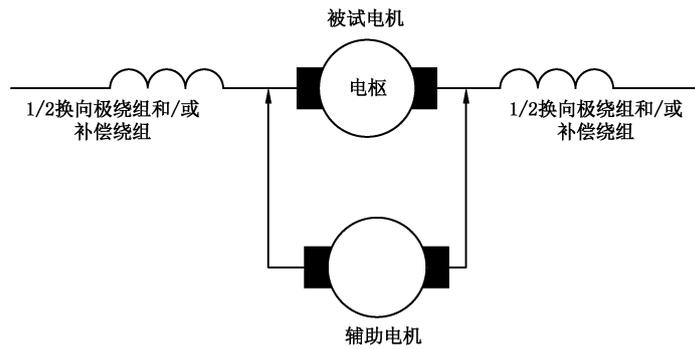


图 21 辅助发电机用以增大或减小电枢电流

如果换向极绕组接在电枢绕组的一边,补偿绕组接在另一边,可用一台辅助低电压发电机与换向极绕组并联,从而改变换向极绕组电流。正向的附加电流(I_b)或反向的附加电流(I_s)应按公式(56)修正到等效电流(I_{beff}):

$$I_{beff} = \frac{W_z}{W_z + W_k \times a_z / a_k} \times I_b \quad \dots\dots\dots (56)$$

式中:

W_z ——一个换向极的绕组匝数;

W_k ——一个极的补偿绕组匝数;

a_z ——换向极绕组并联支路数;

a_k ——补偿绕组并联支路数。

17.3 试验程序

17.3.1 运行条件

本试验应在电枢电流从 0 到 100% 额定值变化范围内进行。

当换向极绕组电流增大或减小时,应维持转速和励磁电流不变。

重复测试不同电枢电流值求出各点的附加电流,并作出其与电枢电流对应的关系曲线,求出无火花换向区域的最高值和最低值,见图 22。

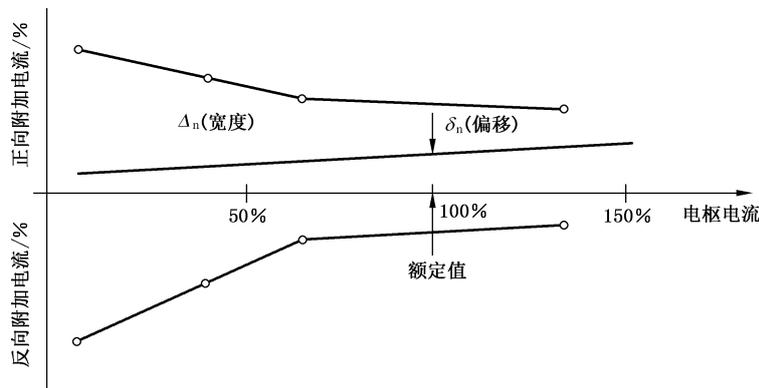


图 22 特定恒转速无火花换向区域

17.3.2 确定换向极绕组最小电流

为确定特定负载下换向极绕组最小电流,在换向极绕组加入反向附加电流,增大该电流直到换向器上能观察到火花,再渐渐减少该电流直到火花恰好消失。

17.3.3 确定换向极绕组最大电流

为确定特定负载下换向极绕组最大电流,在换向极绕组加入正向附加电流,增大该电流直到换向器上能观察到火花,再渐渐减少该电流直到火花恰好消失。

17.4 无火花换向区域宽度(Δ_n)和偏移(δ_n)的计算

每一个试验点无火花换向区宽度百分比应按公式(57)表示:

$$\Delta_n = \frac{I_b - I_s}{I_{aN}} \times 100\% \quad \dots\dots\dots(57)$$

无火花换向区偏移的百分比应按公式(58)表示:

$$\delta_n = \frac{I_b + I_s}{2 \times I_{aN}} \times 100\% \quad \dots\dots\dots(58)$$

式中:

I_b —— 正向最大附加电流(见 17.3.3),单位为安培(A);

I_s —— 反向最大附加电流(见 17.3.2),单位为安培(A);

I_{aN} —— 额定电枢电流,单位为安培(A)。

补偿绕组电流方向定义为正方向,因此正向附加电流为正,反向附加电流为负,分别以各自的符号代入公式。

若无火花换向区一半宽度比无火花换向区偏移小,就会出现火花。

一般认为理想状况是偏移等于零,即水平轴线位于两个限值中间。

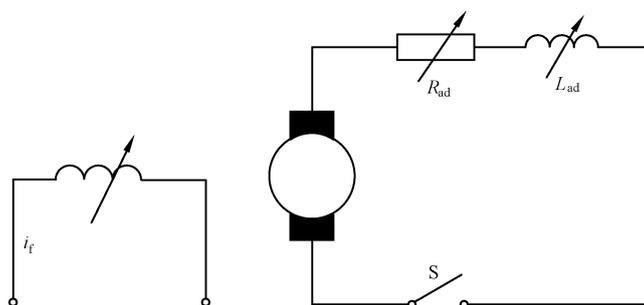
18 电枢电流变化率的测定

18.1 通用要求

应依据换向允许极限来确定电枢电流最大允许变化率。若制造厂与用户协议规定了电枢电流变化率的平均值和/或初始值,则本试验可用来验证在所规定值状态下的换向未达到其换向极限。

18.2 试验准备

试验线路见图 23。



标引序号说明:

i_f —— 励磁电流;

R_{ad} —— 电机接线端接入电阻;

L_{ad} —— 电机接线端接入电感;

S —— 回路开关。

图 23 确定电枢电流变化率的试验线路

为确定外接电阻的初始值,设:

- L_{ac} ——电机内电枢回路的电感值,单位为亨利(H);
- R_{ac} ——电机内电枢回路的电阻值,单位为欧姆(Ω);
- L_{ad} ——电机外接电抗器的电感值,单位为亨利(H);
- $(\Delta i / \Delta t)_{avg}$ ——电枢电流变化率的平均值;
- I_{aN} ——电枢电流额定值,单位为安培(A);
- $I_{a,max}$ ——电枢电流峰值,单位为安培(A)。

则,外接电阻的阻值能按公式(59)估算:

$$R_{ad} = \frac{U_a}{I_{a,max}} - R_{ac} \dots\dots\dots (59)$$

式中 U_a 按公式(60)计算:

$$U_a = 3.16 \times (L_{ac} + L_{ad}) \times (\Delta i / \Delta t)_{avg} \times I_{aN} \dots\dots\dots (60)$$

18.3 试验程序

18.3.1 运行条件

被试验电机作为电动机在额定转速、恒定励磁电流下空载运行,试验中,复励电机应将串励绕组断开,而串励电机应改为他励。

18.3.2 电枢电流上升测试

应断开被试电机电源,在端子处接入负载电阻器和电抗器。

电流上升速率应采用记忆示波器或具有合适响应速度的记录仪进行记录。

用制造厂认为可靠的任何方法来评定换向状态,如果换向状态未达到其极限,应相应地调整线路参数并反复进行试验,直到获得最大允许的电流上升速率。改变外接电阻器和电抗器的参数,或在试验前预先调节励磁电流能改变电路参数,见图 23。

18.4 计算电枢电流变化率初始值

电流变化率平均值 $(\Delta i / \Delta t)_{avg}$ (标么值)可按公式(61)求得,见图 24。

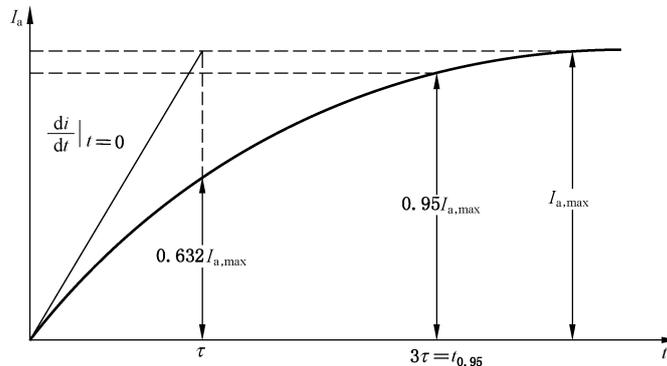


图 24 电枢电流瞬态变化

$$(\Delta i / \Delta t)_{avg} = \frac{0.95 \times I_{a,max}}{t_{0.95} \times I_{aN}} = \frac{0.95 \times I_{a,max}}{3 \times \tau \times I_{aN}} \dots\dots\dots (61)$$

式中:

$t_{0.95}$ —— $t_{0.95} = 3\tau$,是电枢电流从 0 增加到 $0.95 I_{a,max}$ 的时间,单位为秒(s)。

时间常数 τ 按公式(62)计算:

$$\tau = \frac{L_{ac} + L_{ad}}{R_{ac} + R_{ad}} \dots\dots\dots (62)$$

则,电枢电流初始变化率(标么值)按公式(63)计算:

$$\left. \frac{di}{dt} \right|_{t=0} = \frac{I_{a,max}}{\tau \cdot I_{aN}} \dots\dots\dots (63)$$

19 并(他)励磁调整曲线

19.1 概述

试验目的是测定当励磁电流从约 1.5 倍额定值均匀减少至最小值时,电动机转速的变化,此最小励磁电流值使电动机运行在最高转速。

19.2 运行条件

被试验电机应作为电动机在额定电枢电压下空载运行,试验应在热稳定状态下进行,各试验点应快速完成以免绕组温度有明显变化。

励磁绕组回路尽可能由独立的励磁机来供电。

19.3 试验程序

励磁电流初始设定在约 1.5 倍额定值,记录转速,然后按照最少 5 个间隔减少励磁电流直至达到电机最高转速,其中宜包含额定励磁电流点。

在每个励磁电流试验点,同时记录电机转速。

19.4 绘制并(他)励调整曲线

以测得的转速对励磁电流绘制函数曲线。

20 (空载和负载)磁饱和曲线

20.1 概述

本试验目的是测定在额定转速、空载和负载情况下,当励磁电流增加至约 1.5 倍额定值时,输出电压的变化。

20.2 运行条件

试验应在热稳定状态下进行,各试验点应快速完成以免绕组温度有明显变化。

励磁绕组回路应由独立的励磁机供电。

20.3 试验程序

20.3.1 通用要求

被试电机应作为发电机在额定转速下运行,试验通常在空载时进行,如果被试电机是按照发电机额定来设计的,还应在额定负载时进行试验。

改变励磁电流时,应按照固定方向上升至最大值或减少至最小值。

20.3.2 空载试验

励磁电流初始值设定在零,然后按照最少 5 个间隔增加至 1.5 倍额定值,再按同样的间隔数减少至零,应有一个或两个励磁电流值对应额定值。

在每个励磁电流测试点,同时记录电枢电压值。

20.3.3 负载试验

励磁电流初始值设定在额定值,然后在试验设备许可范围内按 20.3.2 的规定进行调整。

20.4 磁化曲线

以测得的电枢电压(在空载和负载情况下)对励磁电流绘制函数曲线。

20.5 电动机(串励电机除外)运行时空载磁饱和曲线

若无法获得合适的外部驱动,电机可在无机械耦合的情况下由独立的无纹波直流电源供运行进行试验,从而读取近似空载饱和曲线的数据。供电电源应能在额定电压的 25%~125% 范围内调节,调节时按上升或下降固定方向以避免磁滞效应的影响。作为电动机空载运行时,由于电枢电流的影响,在各电压下获得额定转速所需的励磁电流与空载饱和数据不同。

低电压时电机可能变得不够稳定,应采取预防措施防止超速。

21 其他试验

21.1 检查试验

检查试验总是在制造厂进行的,试验是制造厂在已装配的电机上进行。电机不需要完全装配好,它可能缺少一些不会影响试验结果的部件。检查试验被试电机不必带负载机械。

最少的试验项目列于表 7,它适用于额定输出小于或等于 20 MW(MVA)的电机。对 200 kW(kVA)以上的电机还可以进行其他项目的检查试验。

直流电机按其大小和设计,负载状态下的换向试验也可作为检查试验项目。

表 7 最少检查试验项目

项号	试验	他励或并励直流电机
1	绕组冷态电阻	√
2	空载损耗和空载电流	—
3	额定转速额定电枢电压时的励磁电流	√
4	旋转方向	√
5	耐电压试验	√
<p>注 1: 测量空载损耗和空载电流时不要求达到温升稳定。</p> <p>注 2: 表中“√”表示“要求进行该项试验”,“—”表示“不要求进行该项试验”。</p>		

21.2 耐电压试验

21.2.1 通用要求

耐电压试验应按 GB/T 755—2019 中 9.2 的规定或该类型电机标准的规定进行。在试验过程

中,被试电机应无故障发生。

试验应在电机静止的状态下进行,试验前应先测定绕组的绝缘电阻,在冷态下测得的绝缘电阻,按绕组的额定电压计算不应低于 $1\text{ M}\Omega/\text{kV}$ 。如需进行超速、偶然过电流或短时过转矩试验时,本项试验应在这些试验后进行;如需进行温升试验,则应在温升试验后立即进行。

试验时,电压应施加于绕组与机壳之间,此时其他不参与试验的绕组均应和铁心及机壳连接。

验收时不应应对绕组再重复进行全值电压的耐电压试验。

21.2.2 试验电压和时间

试验电压的频率为 50 Hz ,波形宜尽可能接近正弦波。

试验电压的电源由试验变压器供给,变压器的容量,对每 1 kV 试验电压不应小于 1 kVA ;对小功率电机,每 1 kV 试验电压不应小于 0.5 kVA 。

试验电压的数值应在试验变压器高压侧用静电电压表或通过电压互感器进行测量。

试验时,施加的电压应从不超过试验电压全值的一半开始,然后以不超过全值的 5% 均匀地或分段地增加至全值,电压自半值增加至全值的时间不应少于 10 s ,全值电压试验时间应持续 1 min ,全值试验电压值应符合 GB/T 755—2019 中表 17 的规定。

当对批量生产的 200 kW (或 kVA)及以下,额定电压 $U_N \leq 1\text{ kV}$ 的电机进行检查试验时, 1 min 试验可用 1 s 试验来代替,并应突然施加试验电压,但试验电压值应为 GB/T 755—2019 中表 17 规定的 120% 。

对于整流电源供电的直流电动机,应依据电机的直流电压或整流电源输入端相与相间额定交流电压的有效值两者中的较高者从 GB/T 755—2019 的表 17 中选取耐电压试验电压值。

21.3 电机偶然过电流试验

规定直流电机过电流能力是为了使电机能与控制和保护装置相匹配。电机绕组的发热效应近似地按时间和电流平方的乘积做变化,超过额定值的电流将会增加绕组的温度。除非另有协议,可认为电机在整个寿命期间,规定的过电流运行的时间为若干个短周期。

偶然过电流试验时,电机应在最高满磁场转速(发电机为额定转速)和相应的电枢电压下进行。

偶然过电流的倍数及其持续时间,按 GB/T 755—2019 或该类型电机标准的规定。

注:注意所给的换向能力限值。

试验时同时检查换向。

对大中型电机,当受试验设备条件限值时,应按附录 E 规定的方法在短路方式下进行。

21.4 电动机的短时过转矩试验

电动机短时过转矩试验时,电压应为额定值,励磁电流应调节到额定值(串励电动机除外)并保持不变。

偶然过转矩的倍数及其持续时间,按 GB/T 755—2019 或该类型电机标准的规定。

试验时同时检查换向。

当受试验设备条件限制时,可用相应的过电流值代替。

调速电动机的短时过转矩试验应分别在最低额定转速和最高额定转速下,按其相应的过转矩值进行。

21.5 超速试验

21.5.1 概述

超速试验通常并非必需,但当有协议作出规定时可能进行该试验。

21.5.2 超速方法及转速测量

电机的超速试验应按 GB/T 755—2019 或该类型电机标准的规定进行。通常,被试验电机可按下述两种方法进行超速:

- a) 被试电机作为电动机运行时,以减小励磁电流及增加端电压的方法使电机超速,端电压的增加应小于 130% 额定电压,减小励磁电流时应使转速平稳上升;
- b) 被试电机用辅助设备驱动到所需转速。

试验时,应采取安全防护措施,尽可能远距离测量转速。

21.5.3 试验后的检查

试验停止后,应检查轴承、冷却风扇、换向器、绑线和紧固部件等有无异常情况出现以及定子与转子之间是否有摩擦等。

21.6 噪声的测定

噪声的测定按 GB/T 10069.1—2006 进行。

21.7 振动的测定

振动的测定按 GB/T 10068—2020 进行。

21.8 匝间绝缘试验

21.8.1 概述

电机电枢绕组匝间绝缘冲击耐电压试验,把电枢从电机中抽出,将由电容器放电产生的冲击电压直接施加于换向器片间,冲击次数和冲击电压峰值按有关标准的规定。试验时,电枢轴需接地,匝间短路的判别可采用波形比较法,以被试绕组波形与正常波形比较,波形一致者为合格。亦可采用其他有效的判别方法。

试验方法有跨距法和片间法,根据绕组类型选择。

21.8.2 跨距法

在换向器上选取一段跨距(推荐 5 片~7 片),将冲击电压直接施加于该跨距首尾两片换向片上。

为了使每一片间都经受一个相同条件的冲击电压试验,宜逐片进行试验(可根据均压线的连接方式减少试验次数)。

21.8.3 片间法

依次对换向器上一对相邻换向片进行试验。试验时,如未试线圈中产生高的感应电压,应在被试换向片两侧的换向片上设置接地装置,并良好接地。

21.9 短时升高电压试验

短时升高电压试验应按该类型电机标准的规定进行。

试验时,发电机可用增加励磁电流及提高转速的方法来提高电压,但转速的数值不应超过 115% 额定转速。对磁路比较饱和的发电机,在转速增加至 115% 且励磁电流亦已增加至允许的限值时,如感应电压仍不能达到所规定的试验电压,则试验可在所能达到的最高电压下进行。

对电动机在提高外施电压时可同时提高其转速,但转速的数值不应超过 115% 额定转速或超速试

验中所规定的转速。允许提高的转速值应按该类型电机标准的规定。

对调速电动机,短时升高电压试验应在最高额定转速下进行。

21.10 电磁兼容性测定

无线电干扰测定按 GB 4824—2019 进行。



附录 A

(规范性)

输入电流及输入功率的修正

A.1 直流电源供电时电动机输入电流修正方法

图 A.1 为永磁电动机、串励电动机及他励电动机测量线路,图 A.2 为并励电动机及复励电动机测量线路,图中 A 和 A_f 为电流表, V 为电压表,电压的测量宜尽可能选用高内阻磁电式电压表。

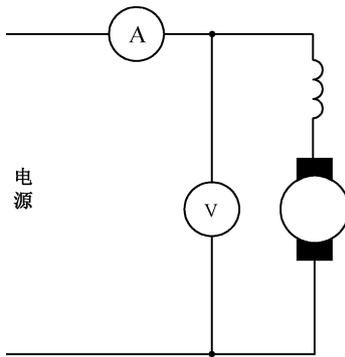


图 A.1 永磁电动机、串励电动机及他励电动机测量线路

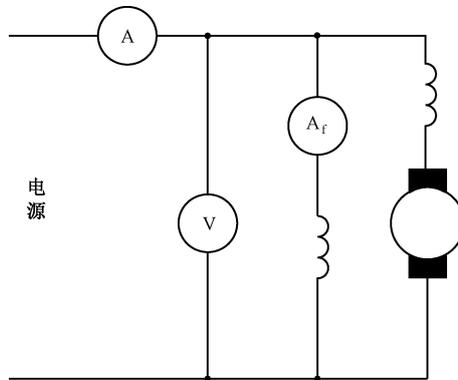


图 A.2 并励电动机及复励电动机测量线路

在效率测定、额定负载试验及热试验中,当通过电压表的电流大于电动机输入电流的 0.5% 时,则应对被试电动机的实际输入电流 I 按公式(A.1)和公式(A.2)进行修正:

$$I = I_A - I_V \quad \dots\dots\dots (A.1)$$

$$I_V = \frac{U}{R_V} \quad \dots\dots\dots (A.2)$$

式中:

- I_A —— 电流表 A 测得的电动机输入电流,单位为安培(A);
- I_V —— 通过电压表的电流,单位为安培(A);
- U —— 电压表测得的电压,单位为伏特(V);
- R_V —— 电压表内阻,单位为欧姆(Ω)。



A.2 并励磁场电流的测定及电枢电流的计算

并励或复励电动机的电枢电流 I_a 按公式(A.3)计算：

$$I_a = I_A - I_V - I_f \quad \dots\dots\dots (A.3)$$

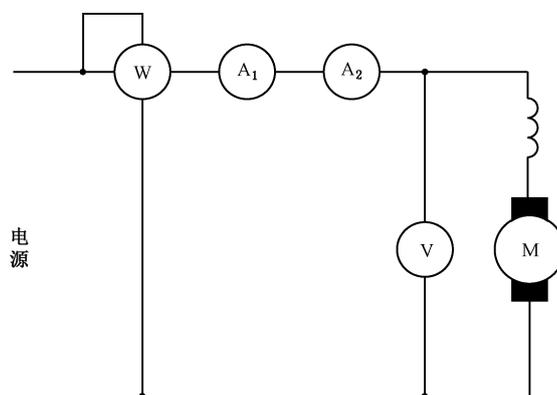
式中：

I_f ——电流表 A_f 测得的并励磁场电流，单位为安培(A)。

并励磁场电流的测定应选用内阻较小的电流表，电流表的电压降不应大于被试电动机额定电压的0.5%，测定时导线压降的影响应设法消除。

A.3 整流电源供电时输入功率的修正

图 A.3 为永磁电动机、串励电动机及他励电动机用整流电源供电进行试验时的测量线路，电压用磁电式电压表测量，通过电压表的电流不应大于被试电动机额定电流的0.5%。电流的平均值及有效值分别用磁电式及电动式电流表进行测量，输入功率用真实读数的瓦特表测量。



标引序号说明：

W —— 瓦特表；

V —— 电压表；

A_1 —— 磁电式电流表；

A_2 —— 电动式电流表；

M —— 被试电动机。

图 A.3 整流电源供电进行试验时的测量线路

被试电动机的实际输入功率 P_1 按公式(A.4)修正：

$$P_1 = P - I^2 \times R \quad \dots\dots\dots (A.4)$$

式中：

P —— 瓦特表测得的输入功率，单位为瓦特(W)；

I —— 电动式电流表 A_2 测得的有效电流，单位为安培(A)；

R —— 磁电式、电动式两只电流表和瓦特表电流线圈的总内阻，单位为欧姆(Ω)。

当 $(I^2 \times R) < 0.5\%P$ 时，可认为 $P_1 = P$ ，不做修正。

当试验结果要求特别准确时，还应在式(A.4)中减去电压表损耗的功率。

附 录 B
(规范性)
转矩读数的修正

B.1 概述

转矩测量设备与被试电机输出轴之间有轴承时,轴承存在摩擦损耗,可根据摩擦损耗求得转矩修正值 T_c 并对转矩读数进行修正,从而求得实际转矩值 T 。

B.2 电动机输出转矩的修正

被试电动机的实际输出转矩按公式(B.1)修正:

$$T = T_d + T_c \quad \dots\dots\dots (B.1)$$

式中:

- T ——被试电动机实际输出转矩,单位为牛顿米(N·m);
- T_d ——试验时测得的被试电动机输出转矩,单位为牛顿米(N·m);
- T_c ——摩擦损耗的转矩修正值,单位为牛顿米(N·m)。

B.3 发电机输入转矩的修正

被试发电机的实际输入转矩按公式(B.2)修正:

$$T = T_d - T_c \quad \dots\dots\dots (B.2)$$

式中:

- T ——被试发电机实际输入转矩,单位为牛顿米(N·m);
- T_d ——试验时测得的被试发电机输入转矩,单位为牛顿米(N·m);
- T_c ——摩擦损耗的转矩修正值,单位为牛顿米(N·m)。

B.4 转矩读数修正值 T_c 的计算方法

转矩读数修正值 T_c 按公式(B.3)计算:

$$T_c = 9.549 \times \frac{(P_1 - P_0)}{n_t} - T_{d0} \quad \dots\dots\dots (B.3)$$

式中:

- P_1 ——被试验电机在接近额定电压下连接转矩测量设备或测功机空转时的输入功率(若为测功机则其电枢及励磁回路应开路),单位为瓦特(W);
- P_0 ——被试电机在上述相同电压下空载运转时的输入功率,单位为瓦特(W);
- T_{d0} ——测定 P_1 时,转矩的读数值,单位为牛顿米(N·m);
- n_t ——测定 P_1 及 T_{d0} 时被试电机的转速(此转速应调节到等于效率测定时的转速),单位为转每分(r/min)。

上述 T_c 的测定方法一般称为空拖试验,应在效率测定后机组安装状态不改变的情况下进行此项试验。被试电机的实际转矩 T 求得后,即可算出较准确的机械功率,从而可求得较准确的效率。



附 录 C
(资料性)
换向火花等级判定

换向火花等级判定见表 C.1。

表 C.1 换向火花等级判定

火花等级	电刷下的火花程度	换向器及电刷的状态
1	无火花	换向器上没有黑痕及电刷上没有灼痕
$1\frac{1}{4}$	电刷边缘仅小部分(约 $1/5\sim 1/4$ 刷边长)有断续的几点状火花	
$1\frac{1}{2}$	电刷边缘大部分(大于 $1/2$ 刷边长)有连续、较稀的颗粒状的火花	换向器上有黑痕,但不发展,用汽油擦其表面即能除去,同时在电刷上有轻微的灼痕
2	电刷边缘大部分或全部有连续、较密的颗粒状火花,开始有断续的舌状火花	换向器上有黑痕,用汽油不能擦除,同时在电刷上有灼痕;如短时出现这一级火花,换向器上不出现灼痕,电刷不烧焦或损坏
<p>如所有电刷下的火花程度均匀,则可用一个等级表示,但如在其中一个电刷下面有较高级的火花出现,则按较高级的火花等级确定。如电刷下的火花程度与同等级换向器及电刷的表面状态不一致时,以换向器及电刷的表面状态作为确定火花等级的主要依据,必要时可延长试验时间再行确定。</p>		

附录 D

(规范性)

由测功机试验确定负载杂散损耗的直流分量

D.1 概述

本方法是由测功机或转矩仪进行额定负载试验确定负载杂散损耗的直流分量。

注：本方法不适用于整流电源供电。

D.2 机械功率测量

使用测功机或转矩仪法进行额定负载试验时，轴功率按公式(D.1)计算：

$$P_{\text{mech}} = 2 \times \pi \times T \times \frac{n}{60} \dots\dots\dots (D.1)$$

式中：

T —— 转矩实际值，单位为牛顿米(N·m)，见 5.2.3；

n —— 转速，单位为转每分(r/min)。

为了得到精确结果，测功机定额不得超过被试电机定额的 3 倍。

对于相同的电功率值，测功机中的支架轴承摩擦可能会导致刻度读数不同，这取决于读数之前负载是增加还是减少，因此，应取两组读数的平均值：一组读数取于逐步增加负载，另一组取于减少负载。对每一组读数绘制转矩对电功率的曲线，并采用曲线的平均值。

D.3 检查试验

在电动机的测试过程中，可进行一项检查试验，将电动机作为发电机运行，测功机作为驱动电动机运行。试验方式与通常的电机输入输出测试完全相同，只是在这种情况下，总损耗将等于输入机械功率减去输出电功率，而不是等于输入电功率减去输出机械功率。在两次试验中，所有刻度或仪表中的任何误差都将以相反的方向出现，因此，即使校准中出现了相对较大的误差，两次试验给出的负载杂散损耗的平均值也几乎是正确的。

D.4 试验程序

要求在额定转速和电压下进行试验，将电机作为发电机运行，并在测功机上使用与作为电动机进行试验时相同的机械转矩。发电机和电动机试验时的负载杂散损耗应在两种情况下分别确定，即从测得的总损耗中减去试验温度下的电枢回路 I^2R 损耗、铁心损耗、风摩擦来确定。因为绕组的温度或许无法准确知道，因此在说明由此获得的负载杂散损耗时应有所辨别。此外，当两个大数相减时可能会产生大的误差。

D.5 负载杂散损耗直流分量值的计算

每个试验均应取若干个负载点，按表 D.1 计算负载杂散损耗，并将由此得到的负载杂散损耗对电枢电流作图。通过电动机和发电机试验结果的平均值绘制一条曲线，得出最终的负载杂散损耗值的直流分量值。

表 D.1 负载杂散损耗计算表

序号	项目	# 1	# 2	# 3	# 4	# 5	# 6
1	电枢绕组 I^2R 损耗 P_a						
2	电刷电损耗 P_b						
3	励磁回路损耗 P_c						
4	铁心 P_{fe}						
5	风摩耗 P_{fw}						
6	上述损耗总计						
7	输入功率 P_1						
8	输出功率 P_2						
9	总计损耗(7)－(8)						
10	负载杂散损耗(9)－(6)						
<p>注 1：所有上述数据均为试验条件下所确定的。</p> <p>注 2：带括号数字指本表序号所指的参量。</p>							

附 录 E
(规范性)
直流电机的短路方法

E.1 概述

警示——短路试验期间,空气气隙流量低且电刷位置可能会对负载的稳定性产生负面影响,可能会发生负载电流失控。试验电路应由高分断能力的快速断路器进行保护。若出现不稳定,将电刷位置重新调整到中性线位置。不做预防措施可能会导致设备损坏和人身伤害。

由于直流电机在短路运行时的自励作用,将使电枢电流达到很大数值,可能使电机受到损害。为保证电机可靠运行及稳定的调节,可用下列方法之一进行短路。

E.2 具有串励绕组的电机在发电机方式下的短路方法

电机应接成他励,串励绕组反向接入(差复励)。用感应法检查其极性,在电机静止时,主极绕组中交替地接通、断开励磁电流(不应超过额定值的 20%),用直流电压表在串励绕组两端测量其感应电势的极性(见图 E.1),如在接通励磁电流瞬时串励绕组中的感应电势使电压表正向偏转,则主极绕组中接电源正端和串励绕组中接电压表的正端为同极性。

将被试电机按空载发电机方式运行,励磁电源的极性与前相同,用电压表测电枢两端电压的极性,然后停机将串励绕组的正端与空载发电机电压的负端相连接,此时串励绕组即为反向接入(见图 E.2)。

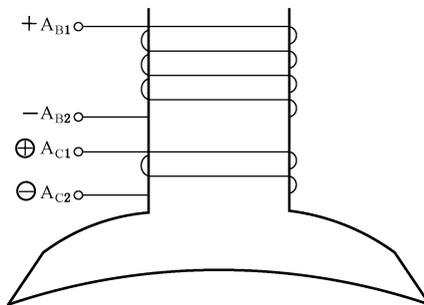


图 E.1 感应法检查串励绕组的极性

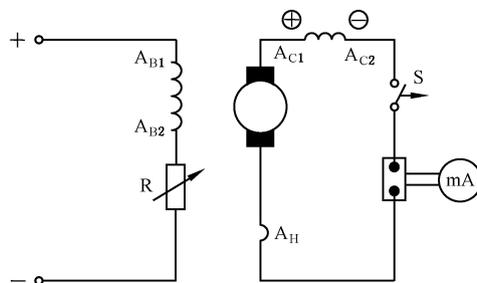


图 E.2 反向接入串励绕组的短路方法

E.3 在发电机方式下用功率扩大机控制励磁的短路方法

试验电路见图 E.3。

按图 E.3 做负载试验时 R_4 应短接。

如果没有功率扩大机,可用复励直流发电机代替,将其串励绕组代替 A_{K3} 接成差复励,或者用两台互相串联(其电势方向相反)的励磁机供被试电机励磁(见图 E.4)。

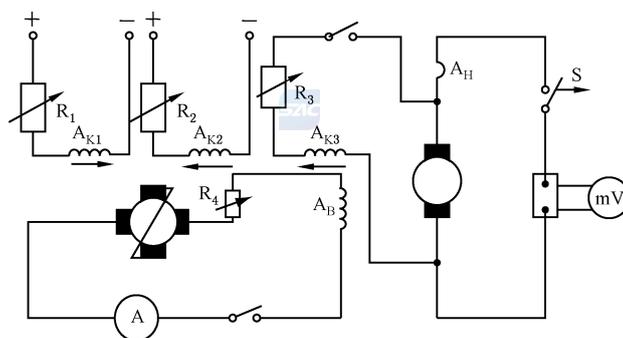


图 E.3 用功率扩大机控制励磁的短路方法

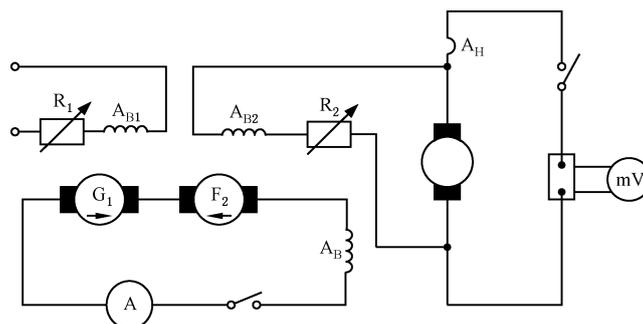


图 E.4 用复励直流发电机控制励磁的短路方法

E.4 临时缠绕串励绕组的短路方法

在主极上临时缠绕一个串励绕组,其极性仍用感应法确定(见图 E.5)。

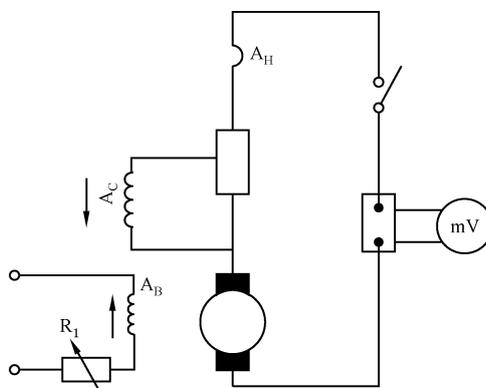


图 E.5 临时缠绕串励绕组的短路方法

E.5 将一半主极绕组反接的短路方法

将并励或串励(对串励电机)绕组分成相同的两组,一组他励(为防止剩磁电压使发电机短路时冲击电流太大,励磁方向应与剩磁方向相反),另一组则并联在电枢两端(见图 E.6)。

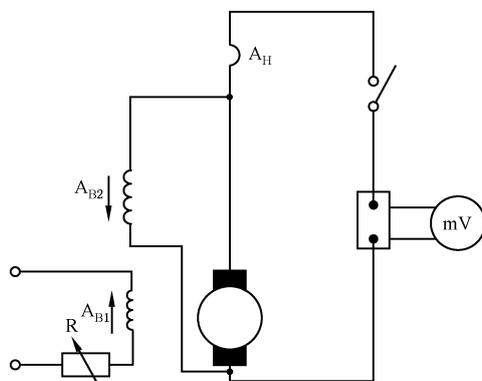


图 E.6 将一半主极绕组反接的短路方法

上述 4 种方法,不但在发电机方式下短路时是必需的,而且在大功率的直流电机作负载试验时,为使其安全可靠地调节,稳定地运行,也是常采用的,E.2 和 E.4 两种方法适用于回馈运行时的辅助电机,E.3 方法适用于被试电机及辅助电机。



参 考 文 献

- [1] GB/T 2900.25—2008 电工术语 旋转电机
 - [2] IEC 60034-19:2014 Rotating electrical machines—Part 19: Specific test methods for d. c. machines on conventional and rectifier-fed supplies
 - [3] IEEE Std 113-1985 IEEE Guide: Test procedures for direct-current machines
-

