



中华人民共和国国家标准

GB/T 1032—2023

代替 GB/T 1032—2012

三相异步电动机试验方法

Test methods for three-phase asynchronous motors

2023-09-07 发布

2024-04-01 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 | 3 |
| 5 基本要求 | 5 |
| 6 试验准备 | 7 |
| 7 热试验 | 11 |
| 8 负载试验 | 20 |
| 9 空载试验 | 23 |
| 10 堵转试验 | 25 |
| 11 各项损耗的确定 | 27 |
| 12 效率的确定 | 34 |
| 13 其他试验项目 | 67 |
| 附录 A (规范性) 仪器仪表损耗及误差的修正方法 | 77 |
| 附录 B (资料性) 确定损耗和效率的试验方法对照表 | 80 |
| 附录 C (资料性) 线性回归分析 | 81 |
| 参考文献 | 83 |

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 1032—2012《三相异步电动机试验方法》，与 GB/T 1032—2012 相比，除结构调整和编辑性改动外，主要技术变化如下：

- a) 增加了第 3 章术语和定义(见第 3 章)；
- b) 删除了确定负载杂散损耗的绕组星接不对称电压空载试验(Eh-star)法(见 2012 年版的 10.6.6)；
- c) 更改了效率试验方法的不确定度，不再分为高、中和低(见 2012 年版的 11.1.2)，而是划分为优选方法和客户特定协议试验、现场试验、检查试验的方法(见 12.1.4)；
- d) 增加了 B 法使用范围在 2 000 kW 及以下时为优选方法(见 12.1.4)；
- e) 增加了 G1 法使用范围在 2 000 kW 以上时为优选方法(见 12.1.4)；
- f) 更改了最大转矩的测定和最小转矩的测定，合并为转矩转速特性试验(见 13.1, 2012 年版的 12.1 和 12.2)；
- g) 将转矩转速仪法更改为加速度法(见 13.1.2.4, 2012 年版的 12.1.4 和 12.2.4)；
- h) 增加了测量输入法进行转矩转速特性曲线的试验(见 13.1.2.5)；
- i) 删除了附录 B 绕组星接不对称电压空载试验(Eh-star)法测试值的计算(见 2012 年版的附录 B)。

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、浙江江潮电机实业有限公司、佳木斯电机股份有限公司、上海电气集团上海电机厂有限公司、方力控股股份有限公司、中车永济电机有限公司、中擎电机有限公司、无锡欧瑞京电机有限公司、雷勃电气(无锡)有限公司、河北电机股份有限公司、浙江省机电产品质量检测所有限公司、安波电机(宁德)有限公司、中电机股份有限公司、山西电机制造有限公司、江苏锡安达防爆股份有限公司、南阳微特防爆电机有限公司、西安西玛电机有限公司、江西江特电机有限公司、珠海凯邦电机制造有限公司、西门子电机(中国)有限公司、抚顺煤矿电机制造有限责任公司、瑞昌市森奥达科技有限公司、山东艾克索仑电气有限公司、湖南大学、上海电科电机科技有限公司、上海电器科学研究所(集团)有限公司、南方泵业股份有限公司、广东省东莞电机有限公司、江苏大中电机股份有限公司、安徽皖南电机股份有限公司、江门市江晟电机厂有限公司、山东华力电机集团股份有限公司、中研技术有限公司、浙江金龙电机股份有限公司、山东齐鲁电机制造有限公司、绍兴摩泰机电科技有限公司、浙江龙创电机技术创新有限公司、湖南联诚轨道装备有限公司、湘潭电机股份有限公司、东方电气集团东方电机有限公司、南阳防爆(苏州)特种装备有限公司、中认尚动(上海)检测技术有限公司、上海煤科检测技术有限公司、无锡东元电机有限公司、抚顺中煤科工检测中心有限公司、四川宏华电气有限责任公司、江苏亚力防爆电机有限公司、兰州电机股份有限公司、浙江通宇变速机械股份有限公司、上海微电机研究所(中国电子科技集团公司第二十一研究所)。

本文件主要起草人：王传军、兰玉华、常颜芹、谢家清、黄晟、曾得恩、戴碧君、宋泽新、周杰、陈理、张伟、蔡海兵、李建华、王启元、王鸿煜、陆进生、田壮、高世峰、王卫平、陈彬、孙保启、孙玉江、王贤长、赵秋月、李海成、徐卫东、周光厚、黄佩佳。

GB/T 1032—2023

本文件及其所代替文件的历次版本发布情况为：

- 1968年首次发布为 GB/T 1032—1968,1985年第一次修订,2005年第二次修订,2012年第三次修订；
- 本次为第四次修订。



三相异步电动机试验方法

1 范围

本文件描述了三相异步电动机的试验要求和试验方法。试验方法包括绝缘电阻的测定、直流电阻的测定、热试验、负载试验、空载试验、堵转试验、损耗和效率的确定、转矩转速特性试验、转动惯量试验、短时过转矩试验、匝间绝缘耐冲击电压试验、工频耐电压试验、转子开路电压的测定、超速试验、振动和噪声的测定、轴电压和轴承电流的测定。

本文件适用于三相异步电动机。

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/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 21211—2017 等效负载和叠加试验技术 间接法确定旋转电机温升
- GB/T 22715—2016 旋转交流电机定子成型线圈耐冲击电压水平
- GB/T 22719.1—2008 交流低压电机散嵌绕组匝间绝缘 第 1 部分:试验方法
- 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
- GB/T 34861—2017 确定大电机各项损耗的专用试验方法
- JB/T 7836.1—2005 电机用电加热器 第 1 部分:通用技术条件
- JB/T 10500.1—2019 电机用埋置式热电阻 第 1 部分:一般规定、测量方法和检验规则
- T/CMIF 129—2021/T/CEEIA 492—2021 电机试验用静止变频电源技术条件

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

异步电机 asynchronous machine

一种交流电机,其负载时的转速与所接电网频率之比不是恒定值。

[来源:GB/T 2900.25—2008,411-31-09]

3.2

电动机 motor

将电能转化为机械能的电机。

[来源:GB/T 2900.25—2008,411-33-01]

3.3

型式试验 type test

对按照某一设计而制造的一台或几台电机所进行的试验,以表明这一设计符合一定的标准。

[来源:GB/T 2900.25—2008,411-53-01]

3.4

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]

3.5

绝缘电阻试验 insulation resistance test

在规定条件下,测定绝缘电阻的试验。

[来源:GB/T 2900.25—2008,411-53-48]

3.6

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。

3.7

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。

3.8

空载试验 no-load test

电动机运行时轴上无有效机械输出的试验。

3.9

堵转试验 locked-rotor test

为确定堵转转矩及堵转电流在电机通电而转子堵住时进行的试验。

[来源:GB/T 2900.25—2008,411-53-32]

3.10

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]

3.11

冲击电压试验 impulse test

在绝缘件上施加一个非周期性瞬变电压的试验,试验电压的极性、幅值及波形均需符合预先的规定。

[来源:GB/T 2900.25—2008,411-53-55]

3.12

匝间试验 interturn test

为检查匝间绝缘的完好情况而进行的试验。试验时,以规定幅值的电压施加于绝缘导体的相邻匝之间。

[来源:GB/T 2900.25—2008,411-53-56]

3.13

工频耐电压试验 voltage withstand test

在绝缘上施加工频高电压以确定绝缘介电强度是否符合要求的试验。

[来源:GB/T 2900.25—2008,411-53-49,有修改]

3.14

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]

3.15

噪声级试验 noise-level test

为确定电机噪声级而进行的试验,试验应在规定的运行条件下按规定的测试方法进行。

[来源:GB/T 2900.25—2008,411-53-42]

3.16

振动试验 vibration test

为测定电机各部分在规定条件下的振动情况而进行的试验。

[来源:GB/T 2900.25—2008,411-53-41]

3.17

轴电压试验 shaft-voltage test

在电机带电情况下,为测定电机可能产生轴电流的电压而进行的试验。

[来源:GB/T 2900.25—2008,411-53-43]

4 符号

下列符号适用于本文件。

$\cos\varphi$:功率因数。

f :电源频率,单位为赫兹(Hz)。

I_1 :定子线电流,单位为安培(A)。

I_0 :空载线电流,单位为安培(A)。

I_K :堵转线电流,单位为安培(A)。

I_N :额定电流,单位为安培(A)。

K_1 :定子绕组导体材料在 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。

K_2 :转子绕组导体材料在 0 °C 时电阻温度系数的倒数。

铜 $K_2=235$;

铝 $K_2=225$,除非另有规定。

如用其他材料,另行规定。

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

n :试验时测得的转速,单位为转每分(r/min)。

n_s :同步转速,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,单位为瓦特(W)。

P_2 :输出功率,单位为瓦特(W)。

P_N :额定(输出)功率,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_c :恒定损耗,单位为瓦特(W)。

P_{Lr} :剩余损耗,单位为瓦特(W)。

- P_{LL} : 负载杂散损耗, 单位为瓦特(W)。
- P_K : 堵转时的输入功率, 单位为瓦特(W)。
- P_s : 在试验温度下定子绕组 I^2R 损耗, 单位为瓦特(W)。
- P_r : 在试验温度下转子绕组 I^2R 损耗, 单位为瓦特(W)。
- $P_{s,\theta}$: 在规定温度(θ_s)下定子绕组 I^2R 损耗, 单位为瓦特(W)。
- $P_{r,\theta}$: 在规定温度(θ_s)下转子绕组 I^2R 损耗, 单位为瓦特(W)。
- P_T : 总损耗, 单位为瓦特(W)。
- P_{mech} : 轴功率, 单位为瓦特(W)。
- R_1 : 定子绕组初始(冷态)端电阻的平均值, 单位为欧姆(Ω)。
- R_N : 额定负载热试验结束时测取的第一点定子绕组热态端电阻, 单位为欧姆(Ω)。
- R_t : 试验温度下测得(或求得)的定子绕组端电阻, 单位为欧姆(Ω)。
- R_θ : 换算到规定温度(θ_s)时的定子绕组端电阻, 单位为欧姆(Ω)。
- R_0 : 空载试验(每个电压点)定子绕组端电阻, 单位为欧姆(Ω)。
- R_c : 确定温升用的绕组初始(冷态)端电阻, 单位为欧姆(Ω)。
- s_t : 试验时测得(或求得)的转差, 单位为转每分(r/min)。
- s : 转差率。
- s_θ : 换算到规定温度(θ_s)时的转差率。
- 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($N \cdot m$)。
- T : 修正后的转矩, 单位为牛顿米($N \cdot m$)。
- T_K : 堵转时转矩, 单位为牛顿米($N \cdot m$)。
- T_{max} : 最大转矩, 单位为牛顿米($N \cdot m$)。
- T_{max_t} : 在试验电压 U_t 下测得的最大转矩, 单位为牛顿米($N \cdot m$)。
- T_{min} : 最小转矩, 单位为牛顿米($N \cdot m$)。
- T_{min_t} : 在试验电压 U_t 下测得的最小转矩, 单位为牛顿米($N \cdot m$)。
- U : 端电压, 单位为伏特(V)。
- U_0 : 空载试验端电压, 单位为伏特(V)。
- U_K : 堵转试验端电压, 单位为伏特(V)。
- U_N : 额定电压, 单位为伏特(V)。
- θ_c : 测量 R_c 时绕组的实际温度, 单位为摄氏度($^\circ C$)。
- θ_1 : 测量初始(冷态)电阻 R_1 时的绕组温度, 单位为摄氏度($^\circ C$)。
- θ_t : 试验时测得的定子绕组最高温度, 单位为摄氏度($^\circ C$)。
- θ_a : 负载试验时冷却介质温度, 单位为摄氏度($^\circ C$)。
- θ_b : 热试验时冷却介质温度, 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_s : 计算效率用的规定温度, 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定子绕组工作温度, 单位为摄氏度($^\circ C$)。
- θ_0 : 空载试验时定子绕组温度, 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 概述

三相异步电动机的性能不仅与电源电压和频率的数值相关,同时与电压波形和电压系统的对称性及频率的偏差和稳定性有关。只有使用符合要求的试验电源(见 5.2)和测试仪器(见 5.3)且仔细正确测量才能得到准确的试验数据。

5.2 试验电源

5.2.1 电压

5.2.1.1 端电压波形

试验电压的谐波电压因数(HVF)应不超过以下数值(按 GB/T 755—2019 中 7.2.1.1 的规定):

0.03——N 设计电动机;

0.02——未加说明的其他电动机。

热试验时,试验电源的谐波电压因数(HVF)值应不超过 0.015(按 GB/T 755—2019 中 8.3.1 的规定)。

5.2.1.2 三相电压系统的对称性

三相电压系统的负序分量应小于正序分量的 0.5%,且零序分量的影响应予消除(按 GB/T 755—2019 中 8.3.1 的规定)。

5.2.2 频率

试验及测量过程中,电源频率的平均值变化应在试验所需频率的 $\pm 0.1\%$ 范围内(见 GB/T 25442—2018 中 5.4.2)。

此要求不适用于等值电路法(见 12.6)。

5.3 测试仪器与测量要求

5.3.1 通则

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,因此,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动机的相关参数相匹配。

5.3.2 电量测量

5.3.2.1 有效值

除非另有规定,否则所有电压和电流的测量值均为有效值(r.m.s.)。

5.3.2.2 电量测量仪器

电量测量仪器的准确度等级应不低于 0.5 级(绝缘电阻表除外)。用 A 法或 B 法(见 12.1.4)确定电

动机效率时,为保证试验结果的准确性和重复性,仪器的准确度等级应不低于 0.2 级。

注:对 GB/T 755—2019 中 9.1 所述的检查试验,准确度等级只需 0.5 级。

数字仪器与无源仪器(非电子式)相比,有非常大的输入阻抗,因此无需因仪器自身损耗而修正读数。但高输入阻抗仪器对干扰更为敏感。应依实践经验,采取减少干扰的措施。

5.3.2.3 仪用互感器(或传感器)

测量用仪用互感器(或传感器)的准确度等级应不低于 0.2 级。当用 B 法确定电动机效率时,若将互感器或传感器与测量电压、电流或功率的仪器作为一个系统进行校准,则系统的误差应不超过满量程的 $\pm 0.2\%$ 。

5.3.2.4 电压测量

测量端电压的信号线应接到电动机绕组引出线端子,如现场不允许这样连接,则应计算由此引起的误差并对读数作校正。应同时测量端电压 U_{uv} 、 U_{vw} 、 U_{wu} ,取其算术平均值计算电动机的相关性能。

5.3.2.5 电流测量

应同时测量电动机的每相线电流,用三相线电流的算术平均值计算电动机的相关性能。

使用电流互感器(或传感器)时,接入二次回路仪器的总阻抗(包括连接导线)应不超过其额定阻抗值。

对 $I_N < 5$ A 的电动机,除堵转试验和超载试验外,不应使用电流互感器(或传感器)。

5.3.2.6 功率测量

应采用两表(两台单相功率表)法测量三相电动机的输入功率,也可采用一台三相功率表或三台单相功率表测量输入功率。功率表的电压信号线应接到绕组引出线端子上。

如仪器仪表损耗影响试验结果的准确性,按附录 A 对仪器仪表损耗及其误差进行修正。

5.3.3 电阻测量

绕组的直流电阻用电桥或数字式微欧计测量,准确度等级应不低于 0.2 级。

5.3.4 频率测量

频率测量仪器的准确度等级应不低于 0.1 级。

5.3.5 转速或转差率测量

5.3.5.1 转速测量

测量 1 800 r/min 及以下转速时,转速测量仪器的误差应在 ± 1 r/min 以内;测量 1 800 r/min 以上转速时,转速测量仪器的误差应不超过 $\pm (0.1 \text{ r/min} + 0.05\% \text{ rd})$ 。

5.3.5.2 转差率测量

可采用比率计直接测量电动机的转差率,见 GB/T 25442—2018。

5.3.6 转矩测量

用于确定效率时,转矩测量设备的准确度等级应不低于 0.2 级,测量的最小转矩值应不小于其标称转矩的 10%,如果转矩测量设备具有更高的准确度,则允许转矩测量范围能相应扩大。

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%。

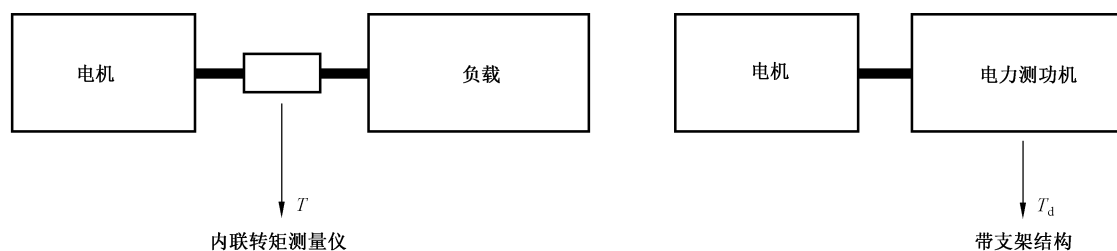


图 1 转矩测量

当采用带有底座支架结构的测功机方式测取电动机轴转矩时(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动机输出轴之间有轴承的情况。电动机的转矩 T 应按公式(1)计算:

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

式中:

T_d ——负载试验中转矩的读数,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),见 8.3。

应注意转矩传感器的温度,如靠近转子,则温度可能高于环境温度,对总体不确定度将产生明显的影响,这种情况下,不确定度应控制在满量程的 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,要进行调整并重新试验。

转矩测量设备用于其他试验时,其准确度等级应不低于 0.5 级。

5.3.7 温度测量

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

5.3.8 绝缘电阻测量

绝缘电阻表的准确度等级应不低于 5 级。

6 试验准备

6.1 绝缘电阻的测定

6.1.1 绕组对机壳及绕组相互间绝缘电阻的测定

6.1.1.1 测量时电动机的状态

测量电动机绕组的绝缘电阻时,应分别在实际冷状态下和热状态(热试验后)下进行。检查试验时,如无其他规定,允许只在实际冷状态下进行测量。测量绝缘电阻时,应同时测量并记录绕组温度,在实际冷状态下测量时,可取周围介质温度作为绕组温度。

6.1.1.2 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 1 选择绝缘电阻表。

表 1 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 |
|-----------------------------|------------|
| $U_N \leq 1\,000$ | 500 |
| $1\,000 < U_N \leq 2\,500$ | 1\,000 |
| $2\,500 < U_N \leq 5\,000$ | 2\,500 |
| $5\,000 < U_N \leq 12\,000$ | 5\,000 |
| $U_N > 12\,000$ | 10\,000 |

6.1.1.3 测量方法

测量绕组绝缘电阻时,如各相绕组的始末端均引出,则应分别测量各绕组对机壳及绕组相互间的绝缘电阻,不参加试验的其他绕组和埋置检温计等元件应与铁心或机壳作电气连接,机壳应接地。如三相绕组已在电动机内部连接仅引出三个出线端时,则测量所有连在一起的绕组对机壳的绝缘电阻。对于绕线转子电动机应分别测量定子绕组和转子绕组的绝缘电阻。

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。

若测量吸收比 IR_{60s}/IR_{15s} ,则应测取施加规定电压后 15 s 和 60 s 时的绝缘电阻值。

若测量极化指数 IR_{10min}/IR_{1min} ,则应测取施加规定电压后 1 min 和 10 min 时的绝缘电阻值。

绝缘电阻测量结束后,每个回路应对地放电。

6.1.2 其他绝缘电阻的测定

6.1.2.1 轴承绝缘电阻的测定

轴承绝缘电阻用 1 000 V 的绝缘电阻表测量。

6.1.2.2 埋置式检温计绝缘电阻的测定

埋置式检温计的绝缘电阻按 JB/T 10500.1—2019 的规定测定。

6.1.2.3 加热器绝缘电阻的测定

加热器的绝缘电阻按 JB/T 7836.1—2005 的规定测定。

6.2 绕组在实际冷状态下直流端电阻和相电阻的测定

6.2.1 实际冷状态下绕组温度的测定

用温度计测定绕组温度 θ_1 。试验前,电动机应在室内放置一段时间,用温度计(或埋置检温计,后同)测得的绕组温度与冷却介质温度之差应不超过 2 K。对大、中型电动机,温度计的放置时间应不少于 15 min。

按短时工作制(S2 工作制)试验的电动机,在试验开始时的绕组温度与冷却介质温度差应不超过 5 K。

6.2.2 绕组直流端电阻的测定

6.2.2.1 通则

绕组出线端 U 与 V、V 与 W、W 与 U 间的直流电阻称为端电阻,分别记为 R_{UV} 、 R_{VW} 和 R_{WU} 。绕组

直流端电阻可用电桥法、微欧计法、直流电压表-电流表法或其他适当的方法测量。

6.2.2.2 电桥法

使用电桥测量时,每一电阻应测量三次,每次应在电桥重新平衡后测取读数。每次读数与三次读数的算术平均值之差,应不超过平均值的 $\pm 0.5\%$,取其平均值作为电阻的实际值。

如绕组的端电阻在 $1\ \Omega$ 及以下时,应用开尔文[双]电桥测量。

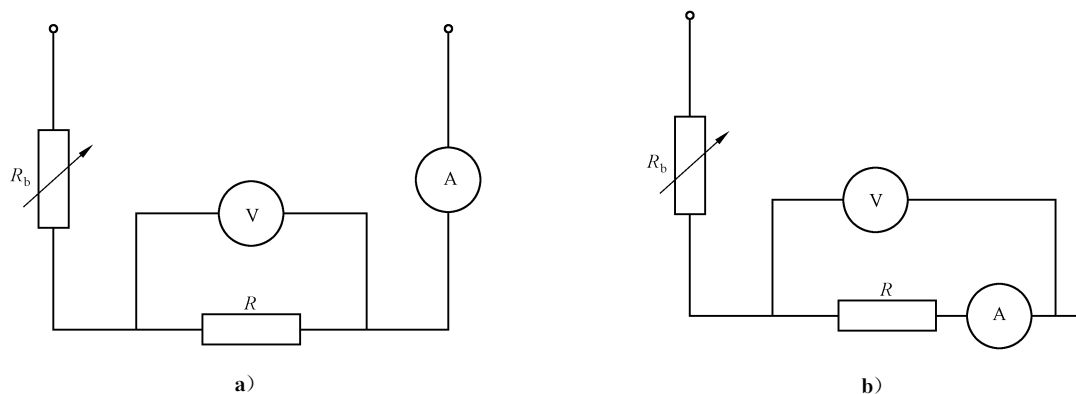
6.2.2.3 微欧计法

当采用自动检测装置或数字式微欧计等仪表测量绕组端电阻时,通过被测绕组的试验电流应不超过其正常运行时电流的 10% ,通电时间不应超过 $1\ \text{min}$ 。若电阻小于 $0.01\ \Omega$,则通过被测绕组的电流不宜太小。

6.2.2.4 直流电压表-电流表法

电压表-电流表法原理接线图见图2所示。其中, R_b 为调节限流电阻, R 为被测绕组端电阻, V 为电压表, A 为电流表。图2a)适用于电压表内阻与被测电阻之比大于200的情况;图2b)适用于电流表内阻与被测电阻之比小于 $1/200$ 的情况。

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 $1\ \text{min}$ 。测量时应同时读取电流值和电压值。每一电阻至少在不同三个电流值下进行测量。每个测量值与几次测量值的算术平均值之差应不超过平均值的 $\pm 0.5\%$,取其平均值作为被测电阻的实际值。



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2 电压表-电流表法原理接线图

6.2.2.5 绕组初始端电阻的算术平均值

绕组初始端电阻的算术平均值 $R_1(\Omega)$ 按公式(2)计算:

$$R_1 = (R_{UV} + R_{VW} + R_{WU})/3 \quad \dots\dots\dots (2)$$

式中:

R_{UV} 、 R_{VW} 、 R_{WU} —— 按6.2.2的规定测得的端电阻值,单位为欧姆(Ω)。

6.2.2.6 相电阻的计算

根据测量的端电阻值,图 3 中的各相电阻值 R_U 、 R_V 、 R_W (Ω)按公式(3)~公式(8)计算:

对星形联结的三相绕组:

$$R_U = R_{med} - R_{VW} \dots\dots\dots (3)$$

$$R_V = R_{med} - R_{WU} \dots\dots\dots (4)$$

$$R_W = R_{med} - R_{UV} \dots\dots\dots (5)$$

对三角形联结的三相绕组:

$$R_U = \frac{R_{VW} R_{WU}}{R_{med} - R_{UV}} + R_{UV} - R_{med} \dots\dots\dots (6)$$

$$R_V = \frac{R_{WU} R_{UV}}{R_{med} - R_{VW}} + R_{VW} - R_{med} \dots\dots\dots (7)$$

$$R_W = \frac{R_{UV} R_{VW}}{R_{med} - R_{WU}} + R_{WU} - R_{med} \dots\dots\dots (8)$$

式中:

$$R_{med} = \frac{R_{UV} + R_{VW} + R_{WU}}{2}, \text{单位为欧姆}(\Omega);$$

R_{UV} 、 R_{VW} 、 R_{WU} ——按 6.2.2 的规定测得的端电阻值,单位为欧姆(Ω)。

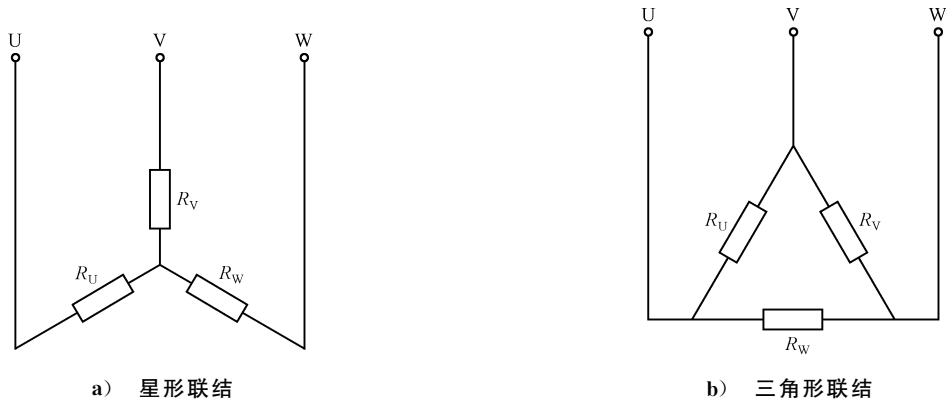


图 3 三相绕组两种联结方法意图

如果各线端间的电阻值与三个线端电阻的平均值之差,对星形联结的绕组均不超过平均值的 $\pm 2\%$,对三角形联结的绕组均不超过平均值的 $\pm 1.5\%$ 时,则相电阻平均值 R_{1p} (Ω)按公式(9)或公式(10)计算:

对星形联结的绕组:

$$R_{1p} = \frac{1}{2} R_1 \dots\dots\dots (9)$$

对三角形联结的绕组:

$$R_{1p} = \frac{3}{2} R_1 \dots\dots\dots (10)$$

式中:

R_1 ——端电阻的算术平均值,单位为欧姆(Ω),按 6.2.2.5 确定。

6.2.3 绕组直流相电阻的测定

如需测定相电阻,则应按 6.2.1 的规定测定绕组温度 θ_1 ,单位为摄氏度($^{\circ}\text{C}$);按 6.2.2.2、6.2.2.3 或

6.2.2.4规定的方法测量相电阻 R_U 、 R_V 和 R_W ，单位为欧姆(Ω)，相电阻的平均值 R_{1p} (Ω)按公式(11)计算：

$$R_{1p} = (R_U + R_V + R_W) / 3 \quad \dots\dots\dots(11)$$

6.2.4 注意事项

测量时电动机的转子静止不动。定子绕组端电阻应在电动机的出线端上测量。绕线转子电动机的转子绕组端电阻宜尽可能在转子绕组与集电环连接的部位上测量。

检查试验时，每一个电阻可仅测量一次。

7 热试验

7.1 目的

热试验的目的是确定电动机在额定负载条件下运行时定子绕组的工作温度和某些部分温度高于冷却介质温度的温升值。

7.2 一般性说明

应对被试电动机予以防护，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温升试验是不适宜的，电动机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。

热试验开始时，应检查所有测温装置，确信其未因杂散磁场的影响而增加温度测量的误差。

全封闭式电动机转子及其他零部件温度在断电停机后用测温装置快速测取。

7.3 温度测量方法

7.3.1 通则

温度测量方法有如下三种：

- 电阻法；
- 埋置检温计法；
- 温度计法。

不同的方法不应作为相互校核之用。

间接测量法按 GB/T 21211—2017 的规定。

7.3.2 电阻法

根据绕组电阻的增加来确定绕组的温度。

测量方法有如下几种：

- 使用合适量程的电桥或微欧计，在试验开始和结束时直接测量，见 6.2.2.2 和 6.2.2.3；
- 用直流电流表-电压表测量，见 6.2.2.4；
- 带电测量法，在不中断交流负载电流的情况下，在负载电流上叠加一微弱直流测量电流，见 GB/T 755—2019 中的 8.6.2.1。

绕组电阻的微小误差在确定温度时会造成较大的误差，因此，本项测量工作要特别注意，确保测得准确的电阻值。

7.3.3 埋置检温计法

用埋入电动机内部的检温计(如电阻检温计、热电偶或半导体负温度系数检温计)来测量温度。检温计在电动机制造过程中埋置于电动机制成后触及不到的部位。

7.3.4 温度计法

用温度计贴附于电动机可触及的表面上来测量温度。术语“温度计”不但包括膨胀式温度计,而且也包括非埋置式热电偶和电阻式温度计。当膨胀式温度计用于测量的强交变或移动磁场的部位的温度时,应采用酒精温度计而不采用水银温度计。

7.4 冷却介质温度的测定

7.4.1 基准冷却介质

电动机基准冷却介质的确定,按 GB/T 755—2019 中表 5 的规定。

7.4.2 空气冷却电动机

对采用周围空气冷却的电动机,应在冷却空气进入电动机的途径中进行多点测量(2~3点)。测点安置在距电动机约 1 m~2 m 处,处于电动机高度的一半的位置,并应防止外来热辐射及气流的影响。

7.4.3 外冷却器电动机

对采用外接冷却器及管道通风冷却的电动机,应在冷却介质进入电动机的入口处测量冷却介质的温度。

7.4.4 内冷却器电动机

对采用内冷却器冷却的电动机,冷却介质的温度应在冷却器的出口处测量;对有液体(一般为水)冷却器的电动机,冷却液的温度应在冷却器的入口处测量。

7.4.5 试验结束时冷却介质温度的确定

7.4.5.1 连续工作制(S1)和断续周期工作制(S3)电动机

对连续工作制(S1)和断续周期工作制(S3)电动机,试验结束时的冷却介质温度,应取在整个试验过程最后的 1/4 时间内,按相同时间间隔测得的温度计读数的平均值。

7.4.5.2 短时工作制(S2)电动机

短时工作制(S2)电动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 试验时间温度计的读数与结束时的温度计读数的平均值。

7.5 绕组及其他各部分温度的测量

7.5.1 绕组温度的测量

通常,绕组的温度按 7.3.2 规定的电阻法测量。温度计法或埋置检温计法,按 GB/T 755—2019 中 8.6 的规定。

电阻法测量绕组温度时,绕组的温度 θ_2 ,单位为摄氏度($^{\circ}\text{C}$),按公式(12)计算:

$$\theta_2 = \frac{R_2}{R_1} \times (K_1 + \theta_1) - K_1 \quad \dots\dots\dots(12)$$

式中：

θ_1 ——测量 R_1 时绕组实际温度，单位为摄氏度(°C)；

θ_2 ——测量 R_2 时绕组实际温度，单位为摄氏度(°C)；

R_1 ——试验开始前测得的初始绕组端电阻，单位为欧姆(Ω)；

R_2 ——绕组温度为 θ_2 时，测得的绕组端电阻，单位为欧姆(Ω)；

K_1 ——定子绕组导体材料在 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。

7.5.2 铁心温度的测量

铁心温度用温度计或检温计测量，对大、中型电动机，测点应不少于 2 个，取几个温度计读数的最高值作为铁心温度。

7.5.3 轴承温度的测量

轴承温度用温度计或检温计测量。对于滑动轴承，温度计放入轴承的测温孔内或者放在接近轴瓦的表面处，对于滚动轴承，温度计放在最接近轴承外圈处。

7.5.4 集电环温度的测量

被试电动机停机后，立即用温度计(或其他适用的方法)测量集电环表面的温度，取测得的最高值作为集电环温度。

7.6 热试验方法

7.6.1 通则

热试验方法有直接法和间接法，应优先采用直接法，间接法仅限用连续工作制电动机。

间接法包括降低电压负载法、降低电流负载法、定子叠频法，其他适用的间接法按 GB/T 21211—2017 的规定。

7.6.2 直接法

7.6.2.1 通则

直接法热试验应在额定频率、额定电压和额定负载或铭牌电流下进行。

7.6.2.2 连续工作制(S1)电动机

连续工作制(S1)电动机的热试验应在额定负载下持续进行，直到各部分温度达到稳定时为止。

试验过程中，每隔 30 min 记录一次三相端电压 U 、三相线电流 I_1 、输入功率 P_1 、频率 f 、转速 n 或转差 s_1 、转矩 T_d (如有)、绕组温度 θ_{wr} (由埋置检温计或热电偶温度计测得)，以及定子铁心、轴承、风道进出口冷却介质温度和周围冷却介质的温度 θ_b 。如采用带电测温法，还应每隔 30 min 以及试验结束前测量绕组的电阻。

如采用外推法确定绕组的温升，被试电动机在断电停机后，应立即测量绕组的电阻，并按 7.6.5.5 确定额定负载热试验后电阻 R_N ，对采用外接冷却器及管道通风冷却的电动机，在切断电源的同时，应停止冷却介质的供给。

如以铭牌电流进行试验，对应于额定输出功率时的绕组温升 $\Delta\theta_N$ (K)按下述方式换算：

当 $\frac{I_1 - I_N}{I_N}$ 超过 $\pm 5\%$ 但在 $\pm 10\%$ 范围内时,按公式(13)计算:

$$\Delta\theta_N = \Delta\theta \left(\frac{I_N}{I_1}\right)^2 \left[1 + \frac{\Delta\theta \left(\frac{I_N}{I_1}\right)^2 - \Delta\theta}{K_1 + \Delta\theta + \theta_b} \right] \dots\dots\dots(13)$$

当 $\frac{I_1 - I_N}{I_N}$ 在 $\pm 5\%$ 范围内时,按公式(14)计算:

$$\Delta\theta_N = \Delta\theta \left(\frac{I_N}{I_1}\right)^2 \dots\dots\dots(14)$$

式中:

- I_N —— 额定电流,即额定输出功率时的定子电流,单位为安培(A),从工作特性曲线上求得;
- I_1 —— 热试验时的定子电流,单位为安培(A),取在整个试验过程最后的 1/4 时间内,按相等时间间隔测得的电流平均值;
- $\Delta\theta$ —— 对应于试验电流 I_1 的绕组温升,单位为开尔文(K),见 7.7。

如 $\frac{I_1 - I_N}{I_N}$ 超过 $\pm 10\%$,应重新做热试验。

7.6.2.3 短时工作制(S2)定额电动机

试验应从实际冷状态开始,试验持续时间按定额的规定。试验过程中,根据工作时限长短,选择每隔 5 min~15 min 读取并记录一次试验数据。其他试验要求同 7.6.2.2。

当 $\frac{I_1 - I_N}{I_N}$ 在 $\pm 5\%$ 范围内时,按公式(14)计算。

当 $\frac{I_1 - I_N}{I_N}$ 超过 $\pm 5\%$ 范围内时,应重做热试验。

7.6.2.4 断续周期工作制(S3)定额电动机

通常采用制造商规定的等效负载定额(见 GB/T 755—2019 的 5.2.6)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。温度的测定应在最后一个工作周期负载时间的一半终了时进行。

对绕线转子电动机,每次启动时,应在转子绕组中串入附加电阻或电抗,将起动电流的平均值限制在 2 倍额定电流(基准负载持续率时的额定电流值)范围内。每一工作周期的运行结束时,电动机应在 3 s 内停止转动。

其他试验要求同 7.6.2.2。

对应于额定功率时的绕组温升 $\Delta\theta_N$ (K)按 7.6.2.3 的规定换算。

7.6.3 间接法

7.6.3.1 降低电压额定电流法

采用降低电压额定电流法时,应进行下列热试验:

- a) 以额定频率和额定电压进行空载热试验,并确定此时的定子绕组温升 $\Delta\theta_0$ 、铁心温升 $\Delta\theta_{fe0}$;
- b) 以额定频率、额定电流和 1/2 额定电压进行热试验,并确定此时定子绕组温升 $\Delta\theta_r$ 、铁心温升 $\Delta\theta_{fer}$ 。此时,额定电流按 12.7.3.2b)的规定确定。试验要求按 7.6.2.2 的规定。

对应于额定功率时的绕组温升 $\Delta\theta_N$ (K)和铁心温升 $\Delta\theta_{feN}$ (K)分别按公式(15)和公式(16)确定:

$$\Delta\theta_N = \alpha \Delta\theta_0 + \Delta\theta_r \dots\dots\dots(15)$$

$$\Delta\theta_{feN} = \alpha \Delta\theta_{fe0} + \Delta\theta_{fer} \quad \dots\dots\dots (16)$$

$$\alpha = \frac{P_0 - P_{0r}}{P_0} \quad \dots\dots\dots (17)$$

式中：

P_0 —— 额定电压时的空载输入功率，单位为瓦特(W)，由空载试验求取；

P_{0r} —— 1/2 额定电压时的空载输入功率，单位为瓦特(W)，由空载试验求取；

α —— 系数，按公式(17)计算。

7.6.3.2 降低电压降低电流组合法

采用降低电压降低电流组合法时，应进行下列热试验：

- 以额定频率和额定电压进行空载热试验，确定此时的定子绕组温升 $\Delta\theta_a$ (K)；
- 以额定频率、降低的电压和最大可能的电流 ($I \geq 0.7I_N$) 进行部分负载下的热试验，确定此时的绕组温升 $\Delta\theta_b$ (K)；
- 以额定频率和对应于 b) 试验的电压进行空载热试验，确定此时的绕组温升 $\Delta\theta_c$ (K)。

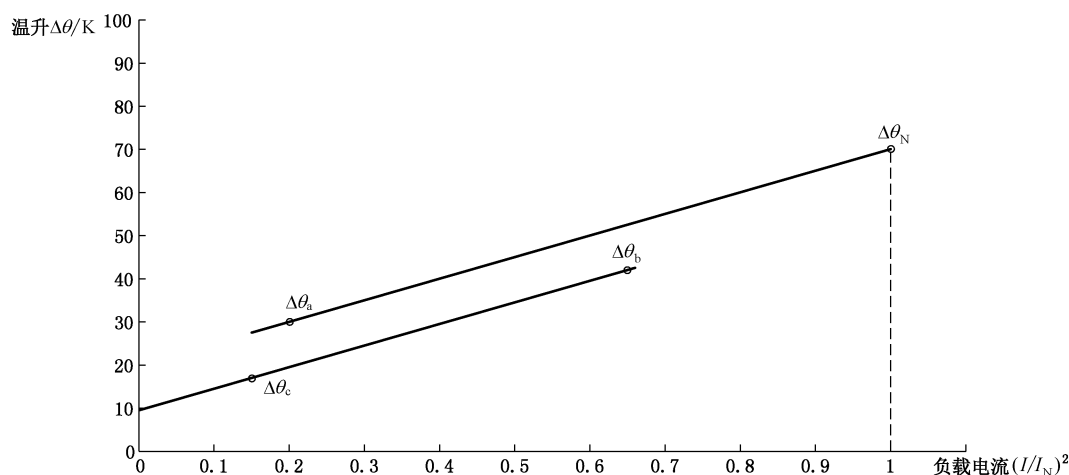


图 4 降低电压降低电流组合法求取绕组温升

可采用图解法确定额定负载时的定子绕组温升，将试验 a)、b) 和 c) 中得到的温升值对定子电流的标幺值的二次方作图。已知 $\Delta\theta_a$ 、 $\Delta\theta_b$ 和 $\Delta\theta_c$ ，连接 $\Delta\theta_b$ 和 $\Delta\theta_c$ 两点作一直线(见图 4)，通过 $\Delta\theta_a$ 点作 $\Delta\theta_b$ 和 $\Delta\theta_c$ 两点连线的平行线。此平行线与横坐标 $(I/I_N)^2 = 1$ 点的垂线交点 $\Delta\theta_N$ (K)，即为被试电动机在额定电压和额定电流时的绕组温升。

7.6.3.3 定子叠频法

试验电路如图 5 所示。主电源和副电源均为发电机，主电源和被试电动机之间经三相叠频变压器与副电源连接，副电源的频率通常约为额定频率的 80% 或 120%，副电源的电压是额定电压的 20% ~ 30%。也可由主电源和副电源串接后直接给被试验电动机供电，或者被试验电动机接在主电源和副电源之间，此时副电源发电机的额定电流应不小于被试电动机的额定电流，电压等级应与被试电动机相同。

采用定子叠频法时，施加于被试电动机绕组的主、副电源的相序应相同。可在接线前由主、副电源分别启动被试电动机，若转向一致，即为同相序。

试验时，首先由主电源启动被试电动机，使其在额定频率、额定电压下空载运行。对额定频率为 50 Hz 的电动机，副电源的频率 f_2 应在 38 Hz ~ 42 Hz 范围内选择。然后，调节副电源的输出电压(如

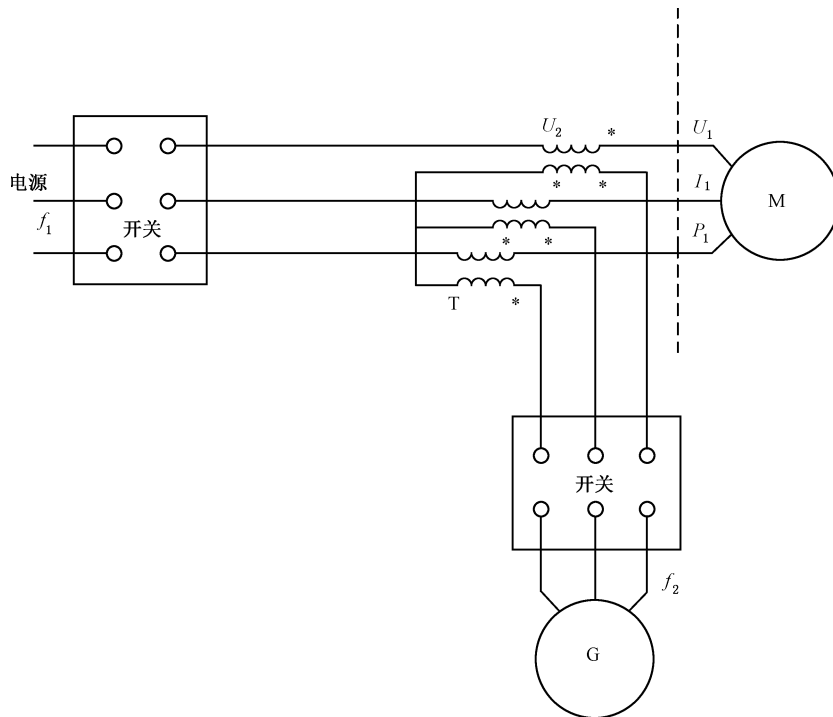
有必要也需要调节主电源电压)直至同时达到下述条件:

- a) 叠频电机的电流有效值等于其额定电流;
- b) 叠频电机的电压有效值等于其额定电压;
- c) 转速等于其额定转速。

被试电动机在额定电压时的额定电流值按 12.6 或 12.8 的规定确定。试验要求同 7.6.2.2。

在调节被试电动机的负载时,如数据跳动较大或被试电动机和试验电源设备的振动较大,应先降低副电源电压,选择另一个频率 f_2 的值,再行试验。试验期间宜监视电动机的振动以免发生损坏。

能达到上述试验目标的电机试验用静止变频电源(按 T/CMIF 129—2021/T/CEEIA 492—2021 的规定),亦可用于定子叠频法试验,静止变频电源应符合试验电源(见 5.2)的要求。



标引序号说明:

- M —— 被试电动机;
- T —— 串接变压器;
- G —— 副电源发电机;
- U_1 —— 端电压(额定电压);
- f_1 —— 频率(额定频率);
- I_1 —— 被试电动机电流;
- U_2 —— 副电压;
- f_2 —— 副电源频率;
- P_1 —— 被试电动机输入功率。

注 1: 副电源相序与主电源相同。

注 2: U_2 小于 U_1 (通常为 U_1 的 20%~30%), U_2 是产生额定电流 I_1 所需要施加的电压值。

图 5 定子叠频法试验电路图

7.6.4 多种定额电动机

具有多种定额的电动机(如多速或油井用电动机),应在出现最高温升的定额状态下进行热试验。

如事先无法预知,应分别在每种定额状态下进行试验。双频电动机可在任一方便的频率下进行试验,只是要把负载调节到等效于一个频率下运行的负载,且电动机以该频率运行时将会出现最大温升。

使用系数大于 1.0 的电动机,应在使用系数负载状态下进行热试验,以确定其温升值。而计算电动机性能时,应当用使用系数为 1.0(额定功率)时的热试验数值。

7.6.5 试验程序

7.6.5.1 初始状态

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应不大于 2 K。

按短时工作制额定(S2 工作制)试验的电动机,在热试验开始时的温度与冷却介质温度差应在 5 K 以内。

可在任一合适的冷却介质温度下进行试验。

7.6.5.2 允许适当过载

连续工作制额定电动机,达到热平衡可能需要较长的时间,为了缩短试验时间,在预热阶段允许适当过载 25%~35%。

7.6.5.3 温度测量

用合适的温度测量方法(见 7.3)测定被试电动机的绕组、定子铁心、进入冷却介质以及受热后排出的冷却介质的温度。每种测量方法都有其特点,适用于测量被试电动机特定部件的温度。

热试验期间,可用温度计测量以下部件的温度。如有规定,可在停机后测量:

- a) 定子绕组,至少在两个部位;
- b) 定子铁心,对中、大型电动机,至少在两个部位;
- c) 环境温度;
- d) 从机座或排气通风道排出的空气或者带循环冷却系统的电动机排到冷却器入口处的内部冷却介质;
- e) 机座;
- f) 轴承(如属于电动机的部件)。

应将温度敏感元件放置于能测得最高温度的部位,对于进、出气流的空气或其他冷却介质的温度,敏感元件应放置于测得平均温度的部位。

热试验期间,可用局部检温计测量电动机各部件的温度。当用几个局部检温计测取绕组温度时,应当记录全部检温计的温度读数,取其中的最大值作为由局部检温计测取的绕组温度。通常不需要停机后读取检温计读数。

当电动机装有几只埋置检温计时,热试验过程中应当记录全部检温计的读数,取其中的最大值作为由埋置检温计测取的绕组温度。

电动机的定子绕组及绕线电动机的转子绕组的温度应采用断电停机后测得的电阻确定(见 7.5.1)。应在出线端处直接测量任意两个线端之间的电阻,此电阻已测量了初始值和初始温度。若试验过程中有设备能够测量绕组电阻,且准确度足够,则也可以应用。

电动机上装备的诸如轴承、润滑油等的测温元件,其温度同样宜注意和记录。

7.6.5.4 热试验持续时间

对连续工作制(S1)定额电动机,热试验应持续进行至热稳定,即进行到相隔 30 min 的两个相继读数之间温升变化在 1 K 以内为止。但对温升不易稳定的电动机,热试验应进行到相隔 60 min 的两个相

继续数之间的温升变化在 2 K 以内为止。

对短时工作制(S2)定额电动机,热试验应按定额中规定的时间。

断续周期工作制(S3)定额电动机,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。

对非连续工作制电动机,读数的时间间隔应与其时间定额一致。

7.6.5.5 断电停机后热电阻的确定

热试验结束应迅速断电停机。要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。

a) 短促停机时间

从断电瞬间算起,如在表 2 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 2 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 |
| $P_N > 5\ 000$ | 按协议 |

b) 外推停机时间

如在表 2 规定时间范围内未能得到电阻的第一点读数,则应尽快地在表 2 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 2 中与电动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的平均温度。宜采用半对数坐标,温度绘制在对数坐标轴上。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 2 列出的 2 倍时间内读到第一点读数,则应协议确定最长延滞时间。

7.7 温升

电动机某一部分的温升就是用 7.3 中规定的适当方法测得的该部分温度与用 7.4 中规定的方法测得的冷却介质温度之差。

当电动机用周围空气直接冷却时,温升是测得的绕组温度减去冷却介质温度,如公式(18)。如用远处或冷却器来的空气通风冷却,温升是测得的绕组温度减去进入电动机的空气温度。

$$\Delta\theta = \frac{R_N}{R_c} \times (K_1 + \theta_c) - K_1 - \theta_b \dots\dots\dots(18)$$

式中:

R_N ——断电停机后测得的第一点热态端电阻,单位为欧姆(Ω);

R_c ——热试验开始前测得的冷态绕组端电阻,单位为欧姆(Ω);

θ_b ——热试验结束时冷却介质温度,单位为摄氏度($^{\circ}\text{C}$);

θ_c ——测量 R_c 时绕组实际温度,单位为摄氏度($^{\circ}\text{C}$);

K_1 ——常数。对铜绕组,为 235;对铝绕组,为 225,除非另有规定。

为了与温升限值或温度限值作比较,如有可能,温度应在热试验结束时立即测量。

如果做不到这点,如用电阻直接测量法,则见 7.6.5.5。

对按实际周期工作工作制(S3~S8)试验的电动机,在最后一个运行周期中,用产生最大发热量的持续时间过了一半时的温度作试验结束时的温度。

如在海拔不超过 1 000 m 处、冷却空气温度在 10 °C~40 °C 之间进行试验,试验获得的温升值不作修正。

注:如试验地点的条件不同于运行地点,温升限值的修改规则,见 GB/T 755—2019 中 8.10。

7.8 额定负载下绕组工作温度的确定方法

7.8.1 通则

绕组工作温度 θ_w 是指电动机在额定负载热试验过程中达到热稳定状态时绕组的温度,单位为摄氏度(°C)。绕组工作温度可用电阻法、局部温度计法或埋置检温计法确定。

7.8.2 电阻法确定绕组工作温度

热试验断电停机后,按 7.6.5.5 中所述的外推法,作热电阻读数对断电后冷却时间(t)的关系曲线,此曲线外推至 $t=0$ 时的电阻值即为 R_w ,单位为欧姆(Ω)。

绕组工作温度 θ_w ,单位为摄氏度(°C),按公式(19)计算:

$$\theta_w = \frac{R_w}{R_c} \times (K_1 + \theta_c) - K_1 \quad \dots\dots\dots (19)$$

式中:

R_w ——外推至 $t=0$ 时热态端电阻,单位为欧姆(Ω);

R_c ——热试验开始前测得的冷态绕组端电阻,单位为欧姆(Ω);

θ_c ——测量 R_c 时绕组实际温度,单位为摄氏度(°C);

K_1 ——常数。对铜绕组,为 235;对铝绕组,为 225,除非另有规定。

7.8.3 局部温度计法确定绕组工作温度

在符合安全的条件下,宜尽量把温度计置于温度最有可能是最高的点或一些点上(如紧挨铁心的绕组端部),安置方式应有效地保护以防止温度计与初级冷却介质接触,而与电动机绕组或其他相关部分有很好的热接触。

任一温度计的最高读数即为绕组的工作温度 θ_w ,单位为摄氏度(°C)。

7.8.4 埋置检温计法确定绕组工作温度

检温计应适当地分布于电动机绕组之中。

在符合安全的条件下,宜尽量把检温计安置在可能是最热点的各个位置上,并采取有效措施防止与初级冷却介质接触。

埋置检温计诸元件的最高读数应作为绕组的工作温度 θ_w ,单位为摄氏度(°C)。

埋置检温计元件及接头可能会失效,并会得出不正确的读数。因此,一旦某个或几个读数有误,通过调查证实,宜予删除。

7.9 计算效率用规定温度的确定

7.9.1 冷却介质基准温度

冷却介质基准温度为 25 °C。若性能试验过程中的环境温度(冷却介质温度)不同于基准环境温度(基准冷却介质温度),则性能的确定应修正到冷却介质温度为 25 °C。空载试验中各损耗和直接法确定负载杂散损耗应使用实际试验温度。

7.9.2 确定绕组工作温度

绕组工作温度 θ_w ，单位为摄氏度(°C)，应按下列先后次序选择其中一种方法确定：

- a) 按 7.8.2 的规定，用外推法外推至 $t=0$ 时求得的电阻值 R_w 来确定；
- b) 按 7.8.3 或 7.8.4 的规定，直接测得；
- c) 根据同一结构和电气设计的完全相同的电动机按 a) 所得的温度来确定；
- d) 若无负载能力，按间接法(见 7.6.3)来确定；
- e) 当不能测取额定负载热试验下绕组工作温度 θ_w 时，应假定规定温度 θ_s 等于表 3 中所列按绝缘结构热分级规定的基准温度 θ_{ref} 。

表 3 基准温度

| 绝缘结构热分级 | 基准温度 θ_{ref} °C |
|---------|---------------------------|
| 130(B) | 95 |
| 155(F) | 115 |
| 180(H) | 130 |
| 200(N) | 155 |

如按照低于绝缘结构使用的热分级规定温升或温度限值，则应按该较低的热分级规定其基准温度。

7.9.3 规定温度

规定温度 θ_s 是绕组工作温度 θ_w 修正到冷却介质温度为 25 °C 时的温度值，单位为摄氏度(°C)，按公式(20)计算：

$$\theta_s = \theta_w + 25 - \theta_b \quad \dots\dots\dots (20)$$

式中：

θ_w ——绕组工作温度，单位为摄氏度(°C)，按 7.9.2 确定；

θ_b ——热试验结束时冷却介质温度，单位为摄氏度(°C)。

所有负载中，应基于电动机处于规定温度时确定其效率。

为了精确地确定某些效率试验方法的损耗分量的值，有必要利用实际试验温度进行分析，若试验温度不等于规定温度，则应对温度相关的 I^2R 损耗进行适当修正。

8 负载试验

8.1 通则

负载试验的目的是确定被试电动机的效率、功率因数、转速、定子电流、输入功率等与输出功率的关系。试验采用直接负载法，用合适的设备(如直流电机或三相感应电机等)给电动机加负载。负载设备的轴线应与被试电动机轴线具有较高的同轴度，并保证安全运行。

8.2 试验程序

试验应在额定电压和额定频率下进行。

试验应在额定负载热试验结束后立即进行，如不可行，则开始读取并记录试验数据之前，定子绕组温度与额定负载热试验测得的温度的差应不超过 5 K。



在至少 6 个负载点处给电动机施加负载:分别约为额定负载的 125%、115%、100%、75%、50%和 25%。施加负载的过程是从最大负载开始,依次降低到最小负载。试验应尽快完成,以减少试验过程中电动机温度变化对试验结果的影响。

所有负载点中,供电电源的频率变化应不超过±0.1%。

在每个负载点处,测取 U 、 I_1 、 P_1 、 T_d (如有)、 n (或 s_1)、 f 、 θ_1 或 R_1 (如有)及 θ_a 。

宜使用温度传感器(埋置于定子绕组端部)测量绕组的温度。

当按 B 法或 A 法确定效率时,应测取每个负载点的 θ_1 或 R_1 ,如本条 a);当按 C 法、E 法或 E1 法确定效率时,允许采用本条 b)规定的方法确定每个负载点处的电阻值;当按本文件规定的其他方法确定电动机效率时,允许采用本条 c)规定的方法确定每个负载点处的电阻值。

确定各个负载点的电阻值的方法有如下 3 种。

- 在定子绕组上预置测温传感器,通过测量定子绕组的温度 θ_1 来确定其电阻值。即,根据温度与电阻成比例的关系,利用试验开始前测得的绕组初始电阻和初始温度及测取的每点温度,可确定每个负载点的电阻值。
- 大于和等于 100% 额定负载点的电阻值是最大负载点读数之前的电阻值。小于 100% 额定负载各点的电阻值按与负载成线性关系确定,起点是 100% 额定负载时的电阻值,末点是最小负载读数之后的电阻值。
- 负载试验结束并断电停机后,立即测取定子绕组电阻并作为各负载点的电阻值。

8.3 转矩读数的修正

8.3.1 通则

转矩测量设备与被试电动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 (N·m)并对转矩读数进行修正。

8.3.2 被试电动机经转矩测量设备与负载电机耦接测试

负载电机如为直流电机,其电枢绕组开路,不励磁。如负载电机为三相异步电机,不接电源。

被试电动机在额定电压和额定频率下运行,测量并记录:输入功率 P_{d0} (W)、定子电流 I_{d0} (A)、转速 n_{d0} (r/min)、转矩 T_{d0} (N·m)、绕组温度 θ_{d0} (°C)或绕组端电阻 R_{d0} (Ω)、频率 f (Hz)。

转差率 s_{d0} ,按公式(21)计算:

$$s_{d0} = 1 - \frac{n_{d0}}{n_s} \quad \dots\dots\dots(21)$$

式中:

n_s ——同步转速,单位为转每分(r/min), $n_s = 60f/p$ 。

定子 I^2R 损耗 P_{sd0} ,单位为瓦特(W),按公式(22)计算:

$$P_{sd0} = 1.5 I_{d0}^2 R_{d0} \quad \dots\dots\dots(22)$$

8.3.3 被试电动机空载测试

被试电动机与转矩测量仪和负载电机脱开,在额定电压和额定频率下空载运行。测量并记录:输入功率 P_0 (W)、定子电流 I_0 (A)、绕组温度 θ_0 (°C)[或绕组端电阻 R_0 (Ω)]。

定子 I^2R 损耗 P_{s0} ,单位为瓦特(W),按公式(23)计算:

$$P_{s0} = 1.5 I_0^2 R_0 \quad \dots\dots\dots(23)$$

8.3.4 确定转矩修正值

转矩修正值 T_c ,单位为牛顿米(N·m),按公式(24)计算:

$$T_c = 9.549 \times \frac{(P_{d0} - P_{sd0} - P_{fe})(1 - s_{d0}) - (P_0 - P_{s0} - P_{fe})}{n_{d0}} - T_{d0} \dots\dots\dots (24)$$

式中：

P_{d0} 、 P_{sd0} 、 s_{d0} 、 n_{d0} 、 T_{d0} ——按 8.3.2 确定；

P_0 、 P_{s0} ——按 8.3.3 确定；

P_{fe} ——空载额定电压铁耗，单位为瓦特(W)，按 9.5 确定。

8.4 轴转矩

被试电动机轴转矩 T ，单位为牛顿米(N·m)，按公式(1)计算，见 5.3.6。

注：在实际应用中，测功机的转矩读数通常是校准补偿过的，因此，如果测功机转矩读数为零，则轴转矩为零。

8.5 轴功率

被试电动机轴功率 P_{mech} ，单位为瓦特(W)，按公式(25)计算：

$$P_{mech} = \frac{T \times n}{9.549} \dots\dots\dots (25)$$

式中：

T ——轴转矩，单位为牛顿米(N·m)，按 8.4 确定；

n ——转速，单位为转每分(r/min)，见 8.2。

8.6 试验温度下定子绕组损耗的确定

试验温度下定子 I^2R 损耗 P_s ，单位为瓦特(W)，按公式(26)计算：

$$P_s = 1.5 \times I_1^2 \times R_1 \times \frac{K_1 + \theta_t}{K_1 + \theta_1} \dots\dots\dots (26)$$

式中：

θ_t ——各负载点处绕组温度，单位为摄氏度(°C)；

R_1 ——绕组初始(冷态)端电阻，单位为欧姆(Ω)；

θ_1 ——测量 R_1 时绕组温度，单位为摄氏度(°C)；

I_1 ——定子电流，单位为安培(A)。

8.7 试验温度下转差率的确定

试验温度下转差率 s ，按公式(27)计算：

$$s = \frac{n_s - n}{n_s}, \text{或 } s = \frac{s_t}{n_s} \dots\dots\dots (27)$$

式中：

n_s ——同步转速，单位为转每分(r/min)， $n_s = 60f/p$ ，其中 f 为试验电源频率，单位为赫兹(Hz)， p 为电动机的极对数；

n ——实测转速，单位为转每分(r/min)；

s_t ——实测转差，单位为转每分(r/min)。

8.8 试验温度下转子绕组损耗的确定

试验温度下转子 I^2R 损耗 P_r ，单位为瓦特(W)，按公式(28)计算：

$$P_r = (P_1 - P_s - P_{fe}) \times s \dots\dots\dots (28)$$

式中：

- P_1 —— 输入功率,单位为瓦特(W);
 P_s —— 试验温度下定子 I^2R 损耗,单位为瓦特(W);
 P_{fe} —— 铁耗,单位为瓦特(W),见 9.5;
 s —— 试验温度下转差率。

9 空载试验

9.1 通则

空载试验时被试电动机轴端无有效机械功率输出。绕线转子电动机的转子绕组应在集电环上短路。

9.2 试验程序

试验应在热试验和负载试验结束后的热状态下立即进行。

若不可行,也可在电动机的输入功率稳定后读取并记录试验数据,即相隔 30 min 的连续两个输入功率读数之差应不大于前一个读数的 3%。

对水-空气冷却电动机,在热试验(或负载试验)后应立即切断水源。

检查试验时,空载运行时间可适当缩短,而且可仅在额定电压值一个试验点测取 P_0 、 U_0 和 I_0 。

被试电动机施加额定频率的可变电压,测试下述 8 个电压点:

- 取约为 110%、100%、95% 和 90% 额定电压的 4 个试验点来确定铁耗;
- 取约为 60%、50%、40% 和 30% 额定电压的 4 个试验点来确定风摩擦。

试验应按电压逐渐减小的次序尽可能快地进行。

在每个电压点,测取 P_0 、 U_0 和 I_0 , 并同时测取绕组温度 θ_0 或端电阻 R_0 (如有)。

当用 A 法或 B 法确定效率时,应确定每一电压点的 R_0 , 如本条 a); 当用其他方法确定效率时,按下述方法中的一种确定各电压点的绕组电阻 R_0 。

确定各个电压点的电阻值 R_0 的方法有如下几种。

- a) 在定子绕组中预置测温传感器,通过测量定子绕组的温度 θ_0 来确定其电阻值。即,根据温度与电阻成比例的关系,利用试验开始前测得的绕组初始电阻和初始温度及测取的每点温度,可确定每个电压点的电阻值。

如测得 θ_0 , 则端电阻 R_0 , 单位为(Ω), 按公式(29)计算:

$$R_0 = R_1 \times \frac{K_1 + \theta_0}{K_1 + \theta_1} \dots\dots\dots (29)$$

式中:

- R_1 —— 定子绕组初始(冷态)端电阻,单位为欧姆(Ω);
 θ_1 —— 测量 R_1 时定子绕组温度,单位为摄氏度($^{\circ}\text{C}$)。
- b) 空载试验前和空载试验结束后立即测量定子绕组电阻 R_0 。中间各试验点的定子绕组电阻值应按照与电功率 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。
- c) 空载试验结束并断电停机后,立即测取定子绕组电阻并作为各电压点的电阻值。
- d) 如定子绕组电阻过低,难以测试,则允许采用计算值。

9.3 空载特性曲线

9.3.1 概述

在 110% 额定电压至最低电压范围内,作 P_0 和 I_0 对 (U_0/U_N) 的关系曲线,即空载特性曲线,见图 6。

从曲线上求取 $U_0=U_N$ 时的 I_0 、 P_0 。

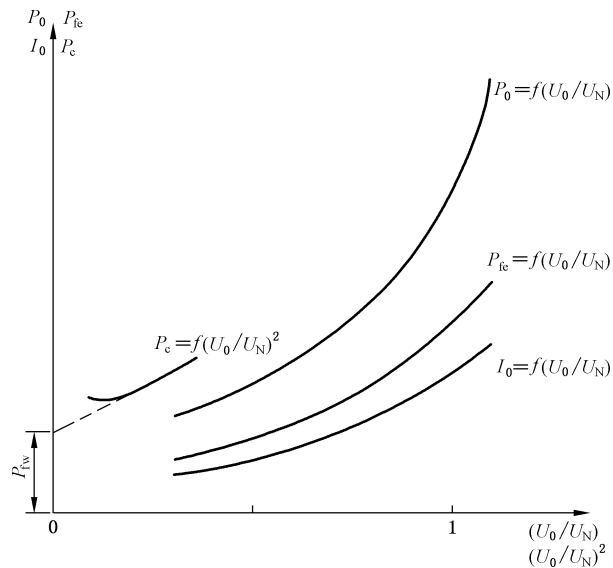


图 6 空载特性曲线

9.3.2 空载损耗

空载输入功率 P_0 就是电动机在空载运行时的总损耗,包括定子 I^2R 损耗、铁耗和风摩耗。因为空载时电动机的转速接近同步转速,即转差率 $s \approx 0$,所以空载时转子 I^2R 损耗可忽略不计。

9.3.3 恒定损耗

空载输入功率减去试验温度下定子 I^2R 损耗的差,即为恒定损耗 P_c ,单位为瓦特(W)。恒定损耗等于风摩耗与铁耗之和。

对空载试验中记录的每一电压点,按公式(30)计算恒定损耗 P_c ,单位为瓦特(W):

$$P_c = P_0 - 1.5 I_0^2 R_0 \quad \dots\dots\dots (30)$$

式中:

P_0 ——空载输入功率,单位为瓦特(W);

I_0 ——空载电流,单位为安培(A);

R_0 ——空载试验温度下端电阻的平均值,单位为欧姆(Ω),按 9.2 确定。

9.4 风摩耗的确定

对约 60% 额定电压至最低电压点范围内的各测试点值,作 P_c 对 $(U_0/U_N)^2$ 的曲线(见图 6),将此直线延长至零电压,零电压处纵轴上的截距即为接近同步转速下的风摩耗 P_{fw0} 。

修正过的风摩耗 P_{fw} ,单位为瓦特(W),按公式(31)计算:

$$P_{fw} = P_{fw0} \times (1 - s)^{2.5} \quad \dots\dots\dots (31)$$

式中:

s ——转差率,按公式(32)计算:

$$s = 1 - \frac{p \times n}{60 \times f} \quad \dots\dots\dots(32)$$

通常,认为风摩耗 P_{fw} 与负载大小无关,即在不同负载下的风摩耗是相同的。

9.5 铁耗的确定

对 90% 额定电压和 110% 额定电压之间的各电压点,作 $P_{fe} = P_c - P_{fw}$ 对 U_0/U_N 的关系曲线。不同负载时的铁耗应根据内电压 U_i 来确定,由 U_i/U_N 在曲线上求得。内电压 U_i 考虑了初级绕组产生的电阻压降,按公式(33)计算:

$$U_i = \sqrt{\left(U - \frac{\sqrt{3}}{2} \times I_1 \times R_t \times \cos\varphi\right)^2 + \left(\frac{\sqrt{3}}{2} \times I_1 \times R_t \times \sin\varphi\right)^2} \quad \dots\dots\dots(33)$$

式中:

P_1 、 U 、 I_1 和 R_t 按 8.2 负载试验确定, $\cos\varphi$ 按照公式(34)计算。

满负载下的铁耗,应在 P_{fe} 对 U_0/U_N 的关系曲线上,通过插值法在 U_i 点上求取。

注 1: 空载额定电压铁耗按 $U_i = U_N$ 确定;

注 2: 满负载下的铁耗可以用空载下的铁耗乘以比率 $(U_0/U_N)^2$ 来计算。

$$\cos\varphi = \frac{P_1}{\sqrt{3} \times U \times I_1} \quad \dots\dots\dots(34)$$

为方便实用,可根据公式(34)和 $\sin\varphi = \sqrt{1 - \cos^2\varphi}$,将公式(33)简化为公式(35):

$$U_i = \sqrt{U^2 - R_t P_1 + \frac{3}{4} R_t^2 I_1^2} \quad \dots\dots\dots(35)$$

当由堵转输入功率求取堵转转矩时,见 10.1.3.2,需要在曲线上求取较低电压点的铁耗,则应对所有空载试验点,作 $P_{fe} = P_c - P_{fw}$ 对 U_0/U_N 的关系曲线。

10 堵转试验

10.1 额定频率堵转试验

10.1.1 通则

除非另有规定,堵转试验应在电动机接近实际冷状态下进行。试验时,应将转子堵住,使其不转动。对绕线转子电动机,应将转子绕组在转子绕组出线端或集电环上短路。

10.1.2 试验程序

试验时,施于定子绕组的电压宜尽可能从不低于 0.9 倍额定电压开始,然后逐步降低电压至定子电流接近额定电流为止,其间共测取 5~7 点读数。每点应同时测取下列数值: U_K 、 I_K 、 T_K 、 P_K 及绕组温度 θ_K 。每点读数时,通电持续时间应不超过 10 s,以免绕组过热。

检查试验时,可仅在额定电流值附近测取一点堵转时的 U_K 、 I_K 和 P_K 。当对笼型转子电动机进行质量检查试验时,可以采用在三相线端的任意两个终端上施加单相额定电压和额定频率的电源,从而避免以机械方式来堵住转子。对三相电动机来说,此时的线电流大约为三相供电时的 86%,而功率约为三相供电时的 50%。如此所测得的值,可以与在同样的组合上进行了完整试验而获得的值进行比较。

如限于设备,对 100 kW 以下的电动机,堵转试验时的最大 I_K 应不低于 4.5 倍 I_N ; 对 100 kW ~

300 kW的电动机,应不低于 2.5~4.0 倍 I_N ;对 300 kW~500 kW 的电动机,应不低于 1.5~2.0 倍 I_N ;对 500 kW 以上的电动机,应不低于 1.0~1.5 倍 I_N 。在最大电流至额定电流范围内,均匀地测取不少于 4 点读数。

堵转转矩取转子在所有角度位置上静止时的最小转矩值,转矩可以用带有绳索和滑轮的秤或力传感器进行测量,也可以用制动器或平衡臂或内联的转矩传感器直接测量。绕线转子电动机的堵转转矩会随着转子相对于定子的角度而一直变化。对笼型转子电动机来说,通常在转子处于任意合适的位置进行堵转即可。

对 100 kW 以上的电动机,如限于设备不能实测转矩时,允许按 10.1.3.2 确定堵转转矩。此时每点应测取 U_K 、 I_K 、 P_K 及定子绕组温度 θ_K 或端电阻 R_K 。

对小功率电动机,试验时,定子绕组上施以额定电压,转子在 90° 机械角度内的 3 个等分位置上分别测定 U_K 、 I_K 、 P_K 、 T_K 。此时,堵转电流取其中的最大值,堵转转矩取其中的最小值。检查试验时,可在额定电压下,任一转子位置上测定。

根据上述试验,绘制堵转特性曲线,即堵转电流 I_K 、堵转转矩 T_K 对外施电压 U_K 的关系曲线,见图 7。

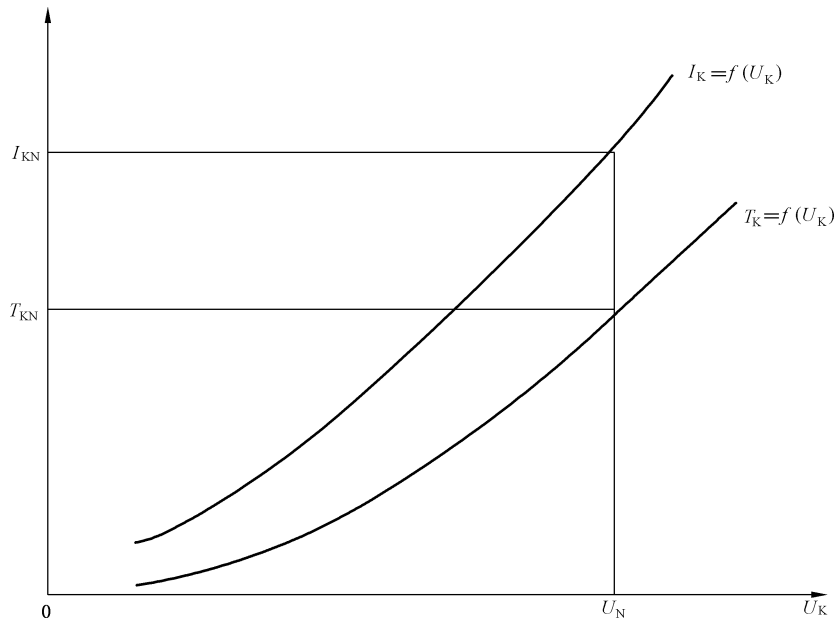


图 7 堵转特性曲线

10.1.3 堵转试验结果计算

10.1.3.1 额定电压时堵转电流和堵转转矩的确定

额定电压时堵转电流 I_{KN} 和堵转转矩 T_{KN} 根据下述情况确定。

- a) 若堵转试验时的最高电压在 0.9~1.1 倍额定电压范围内,堵转电流 I_{KN} 和堵转转矩 T_{KN} 可由堵转特性曲线求取(见图 7);若堵转试验时的最高电压低于 0.9 倍 U_N ,应作 $\lg I_K = f(\lg U_K)$ 曲线,从最大电流点延长线上求取堵转电流 I_{KN} 。此时,堵转转矩 T_{KN} (N·m) 按公式(36)计算:

$$T_{KN} = T_K \times \left(\frac{I_{KN}}{I_K} \right)^2 \dots\dots\dots (36)$$

式中:

T_K ——在最大试验电流 I_K 时测得的或算得的转矩,单位为牛顿米(N·m)。

- b) 对 750 W 及以下电动机,若试验电压在 0.9~1.1 倍额定电压范围内,则堵转电流 I_{KN} (A) 和堵转转矩 T_{KN} (N·m) 分别按公式(37)和公式(38)计算:

$$I_{KN} = I_K \times \frac{U_N}{U_K} \quad \dots\dots\dots(37)$$

$$T_{KN} = T_K \times \left(\frac{U_N}{U_K}\right)^2 \quad \dots\dots\dots(38)$$

10.1.3.2 由堵转输入功率求取堵转转矩

如不能直接测量堵转转矩,按公式(39)求取堵转转矩的近似值(N·m):

$$T_K = 9.549 \times \frac{C_1(P_K - P_{Ks} - P_{fe})}{n_s} \quad \dots\dots\dots(39)$$

式中:

T_K ——堵转转矩,单位为牛顿米(N·m);

P_K ——堵转时输入功率,单位为瓦特(W);

P_{Ks} ——试验电流下定子 I^2R 损耗,单位为瓦特(W);

P_{fe} ——试验电压下铁耗,单位为瓦特(W),根据 (U_K/U_N) ,在曲线上求取,见 9.5;

n_s ——同步转速,单位为转每分(r/min);

C_1 ——计及非基波损耗的降低系数。

注: C_1 是可能介于 0.9~1.0 之间的任意的值,如无经验可循,建议取 $C_1=0.91$ 。

10.2 低频堵转试验



对采用圆图算法(见 12.8)求取工作特性的深槽和双笼型电动机,应在 1/2 额定频率下进行堵转试验(见 12.8.2.1.3)。堵转时的电流和试验要求与 10.1.1 相同。

对采用等值电路法(见 12.6)求取工作特性的电动机,应在 1/4 额定频率下进行低频堵转试验(见 12.6.2.3)。

11 各项损耗的确定

11.1 通则

各项损耗,包括:

- 规定温度下定子绕组 I^2R 损耗,按 11.2 确定;
- 规定温度下转子绕组 I^2R 损耗,按 11.3 确定;
- 风摩耗,按 9.4 确定;
- 铁耗,按 9.5 确定;
- 负载杂散损耗,按 11.6 确定。

注:本文件规定的各项损耗的确定方法与其他文献的对照表见附录 B。

11.2 规定温度下定子绕组 I^2R 损耗的确定

11.2.1 规定温度下定子绕组端电阻

规定温度(θ_s)下定子绕组端电阻 R_0 ,单位为欧姆(Ω),按公式(40)计算:

$$R_0 = R_1 \times \frac{K_1 + \theta_s}{K_1 + \theta_1} \quad \dots\dots\dots(40)$$

式中：

- R_1 ——定子绕组初始(冷态)端电阻,单位为欧姆(Ω)；
- θ_1 ——测量 R_1 时的定子绕组温度,单位为摄氏度($^{\circ}\text{C}$)；
- θ_s ——绕组规定温度,单位为摄氏度($^{\circ}\text{C}$),按 7.9.3 确定。

11.2.2 规定温度下定子绕组 I^2R 损耗的计算

规定温度(θ_s)下定子绕组 I^2R 损耗 $P_{s,\theta}$,单位为瓦特(W),按公式(41)计算：

$$P_{s,\theta} = 1.5 \times I_1^2 \times R_\theta \quad \dots\dots\dots(41)$$

式中：

- I_1 ——定子电流测量值,单位为安培(A),见 8.2；
- R_θ ——规定温度下定子绕组端电阻,单位为欧姆(Ω),按 11.2.1 确定。

注：用同一 R_θ 值计算不同负载点规定温度下定子 I^2R 损耗。

11.3 规定温度下转子绕组 I^2R 损耗的确定

11.3.1 规定温度下转差率的计算

规定温度下转差率 s_θ ,按公式(42)计算：

$$s_\theta = s \times \frac{K_2 + \theta_s}{K_2 + \theta_1} \quad \dots\dots\dots(42)$$

式中：

- s ——转差率,按 8.2 确定；
- θ_1 ——测量转速 n 或转差 s_1 时定子绕组温度,单位为摄氏度($^{\circ}\text{C}$),见 8.2；
- θ_s ——规定温度,单位为摄氏度($^{\circ}\text{C}$),按 7.9.3 确定。

11.3.2 规定温度下转速的计算

规定温度下的转速 n_c ,单位为转每分(r/min),按公式(43)计算：

$$n_c = (1 - s_\theta) \times n_s \quad \dots\dots\dots(43)$$

式中：

- n_s ——同步转速,单位为转每分(r/min), $n_s = 60f/p$ 。

11.3.3 规定温度下转子绕组 I^2R 损耗的计算

规定温度下转子绕组 I^2R 损耗 $P_{r,\theta}$,单位为瓦特(W),按公式(44)计算：

$$P_{r,\theta} = (P_1 - P_{s,\theta} - P_{fe}) \times s_\theta \quad \dots\dots\dots(44)$$

式中：

- P_1 ——输入功率,单位为瓦特(W),见 8.2；
- $P_{s,\theta}$ ——规定温度下定子 I^2R 损耗,单位为瓦特(W),按 11.2.2 确定；
- P_{fe} ——铁耗,单位为瓦特(W),按 9.5 确定；
- s_θ ——规定温度下转差率,按 11.3.1 确定。

11.4 风摩耗的确定

按 9.4 确定。



11.5 铁耗的确定

按 9.5 确定。

11.6 负载杂散损耗的确定

11.6.1 概述

负载杂散损耗是指总损耗中未计入定子 I^2R 损耗、转子 I^2R 损耗、风摩耗和铁耗中的那部分损耗。确定负载杂散损耗的方法有：

- 剩余损耗法, 见 11.6.2;
- 取出转子试验和反转试验法, 见 11.6.3;
- 推荐值法, 见 11.6.4;
- 回馈法, 见 12.4.3.3。

11.6.2 剩余损耗法

11.6.2.1 通则

负载试验中测得的输入功率与测得输出机械功率之差即为视在总损耗, 从视在总损耗中减去试验温度下定子 I^2R 损耗、试验温度下转子 I^2R 损耗、风摩耗和铁耗之后, 剩余的那部分即为剩余损耗。通过对剩余损耗试验数据的线性回归分析求取负载杂散损耗。

按 B 法确定效率时, 规定用剩余损耗法确定负载杂散损耗。

11.6.2.2 视在总损耗

视在总损耗 P_{ST} , 单位为瓦特(W), 按公式(45)计算:

$$P_{ST} = P_1 - P_{mech} \quad \dots\dots\dots (45)$$

式中:

- P_1 —— 输入功率, 单位为瓦特(W), 见 8.2;
- P_{mech} —— 轴功率, 单位为瓦特(W), 见 8.5。

11.6.2.3 剩余损耗

剩余损耗 P_{Lr} , 单位为瓦特(W), 按公式(46)计算:

$$P_{Lr} = P_{ST} - (P_{fw} + P_{fe} + P_s + P_r) \quad \dots\dots\dots (46)$$

式中:

- P_{ST} —— 视在总损耗, 单位为瓦特(W);
- P_{fw} —— 风摩耗, 单位为瓦特(W), 见 9.4;
- P_{fe} —— 铁耗, 单位为瓦特(W), 见 9.5;
- P_s —— 试验温度下定子 I^2R 损耗, 单位为瓦特(W), 见 8.6;
- P_r —— 试验温度下转子 I^2R 损耗, 单位为瓦特(W), 见 8.8。

11.6.2.4 剩余损耗线性回归分析

由于 P_{Lr} 与 T^2 呈线性关系, 对其进行线性回归分析(方法见附录 C)得到:

- 斜率 A ;
- 截距 $B(W)$;
- 相关系数 r 。

截距 B 宜明显小于($<50\%$)额定转矩时的负载杂散损耗 P_{LL} , 否则试验也许有错误宜进行检查。

注: 截距 B 可能是正值或负值。

如相关系数(按附录 C 求取) $\gamma < 0.95$, 剔除坏点后重新进行回归分析。如果 γ 增大至 ≥ 0.95 , 则采用第二次的回归分析; 如果 γ 仍 < 0.95 , 则试验不理想, 表明测试仪器或试验读数、或两者都存在误差。宜调查分析并纠正误差源, 重新进行试验。如果试验数据充足, 相关系数很可能达到 0.98 甚至更好。

11.6.2.5 负载杂散损耗的计算

负载杂散损耗 P_{LL} , 单位为瓦特(W), 按公式(47)计算:

$$P_{LL} = A \times T^2 \quad \dots\dots\dots (47)$$

式中:

A ——斜率;

T ——轴转矩, 单位为牛顿米(N·m), 见 8.4。

11.6.3 取出转子试验和反转试验

11.6.3.1 概述

本试验由两项独立试验组成:

- a) 取出转子试验——测定基频杂散损耗;
- b) 反转试验——测定高频杂散损耗。

11.6.3.2 取出转子试验——测定基频杂散损耗

电动机抽去转子, 可能感应电流的端盖及其他结构件应就位。定子绕组施以额定频率的对称低电压。试验从大电流值开始, 逐步降低, 在 1.1~0.5 倍额定电流范围内至少测取 6 点读数。每点应同时读取 P_1 , I_1 和 θ_1 (或 R_t)。

输入功率 P_1 减去定子绕组在试验温度下的 I^2R 损耗即为基频杂散损耗 P_{sf} , 单位为瓦特(W), 按公式(48)计算:

$$P_{sf} = P_1 - 1.5 \times I_1^2 \times R_1 \times \frac{K_1 + \theta_t}{K_1 + \theta_1} \quad \dots\dots\dots (48)$$

式中:

R_1 ——定子绕组初始(冷态)电阻, 单位为欧姆(Ω), 按 6.2.2.5 确定;

θ_1 ——测量 R_1 时绕组温度, 单位为摄氏度($^{\circ}C$), 按 6.2.1 确定;

θ_t ——试验时测得的绕组温度, 单位为摄氏度($^{\circ}C$);

I_1 ——定子线电流, 单位为安培(A);

P_1 ——输入功率, 单位为瓦特(W)。

11.6.3.3 反转法——测定计算用高频杂散损耗

11.6.3.3.1 概述

优先采用测功机反转法。

11.6.3.3.2 测功机反转法

测功机的功率, 在与被试电动机相同的转速下, 应不大于被试电动机额定功率的 15%。采用转矩测量仪时, 转矩传感器标称转矩应不大于被试电动机额定转矩的 15%。

将测功机或转矩传感器(由其他动力机驱动)与被试电动机耦接。

驱动被试电动机转子, 使之与定子旋转磁场相反方向达到同步转速(如试验电源不是额定频率, 应对应于实际频率的同步转速)。待试验机组机械耗稳定后, 在被试电动机的定子绕组上施以额定频率三相对称的低电压。试验从大电流值开始, 逐步降低。在 1.1~0.5 倍额定电流范围内, 至少测取 6 点读数, 每点应同时测取 P_1 、 I_1 、 T_d 和 θ_1 (或端电阻 R_t)。

断开被试电动机的电源, 机组仍应保持同步转速运转, 测取 T_{d0} 。

如为绕线转子电动机, 转子绕组应在出线端或集电环上短接。

注: 反转试验功率因数较低, 可能要求对功率表读数作相应的误差修正。

高频杂散损耗 P'_{sh} , 单位为瓦特(W), 按公式(49)计算:

$$P'_{sh} = P_d - P_{d0} - \left(P_1 - 1.5 \times I_1^2 \times R_1 \times \frac{K_1 + \theta_t}{K_1 + \theta_1} \right) \dots\dots\dots(49)$$

式中:

R_1 —— 定子绕组初始(冷态)电阻, 单位为欧姆(Ω), 按 6.2.2.5 确定;

θ_1 —— 测量 R_1 时绕组温度, 单位为摄氏度($^{\circ}\text{C}$), 按 6.2.1 确定;

θ_t —— 试验时测得的绕组温度, 单位为摄氏度($^{\circ}\text{C}$);

I_1 —— 定子线电流, 单位为安培(A);

P_1 —— 输入功率, 单位为瓦特(W);

P_d —— 被试电动机轴端输入功率, 单位为瓦特(W), 按公式(50)计算;

P_{d0} —— 在被试电动机在 $I_1 = 0$ 时轴端输入功率, 单位为瓦特(W), 按公式(51)计算。

$$P_d = \frac{T_d \times n_s}{9.549} \dots\dots\dots(50)$$

$$P_{d0} = \frac{T_{d0} \times n_s}{9.549} \dots\dots\dots(51)$$

11.6.3.3.3 异步机反转法

选择一台与被试电动机功率相等或接近、极数相同的异步电机作为驱动电机, 将它与被试电动机用联轴器联接。驱动电机施以额定频率、额定电压(或接近额定电压)。在试验过程中, 频率和电压应保持不变。被试电动机施以额定频率三相对称低电压, 其旋转磁场方向应与驱动电机旋转方向相反, 被试电动机运转在电磁制动状态。试验时, 先启动驱动电机, 待机械耗稳定后, 在低电压下接通被试电动机电源, 使定子电流达到额定值, 预热 10 min。如在热试验后立即进行本项试验, 则不需预热。

试验从大电流开始, 依次降低, 在 1.1~0.5 倍额定电流范围内至少测取 6 点读数。每点应同时测取被试电动机的 P_1 、 I_1 、 θ_t (或 R_1) 和驱动电机的输入功率 P_{a1} 。之后, 切断被试电动机电源, 读取驱动电机的输入功率 P_{a0} 。

高频杂散损耗 P'_{sh} , 单位为瓦特(W), 按公式(52)计算:

$$P'_{sh} = P_{a1} - P_{a0} - \left(P_1 - 1.5 \times I_1^2 \times R_1 \times \frac{K_1 + \theta_t}{K_1 + \theta_1} \right) \dots\dots\dots(52)$$

式中:

R_1 —— 定子绕组初始(冷态)电阻, 单位为欧姆(Ω), 按 6.2.2.5 确定;

θ_1 —— 测量 R_1 时绕组温度, 单位为摄氏度($^{\circ}\text{C}$), 按 6.2.1 确定;

θ_t —— 试验时测得的绕组温度, 单位为摄氏度($^{\circ}\text{C}$);

I_1 —— 定子线电流, 单位为安培(A);

P_1 —— 输入功率, 单位为瓦特(W);

P_{a1} —— 驱动电机的输入功率, 单位为瓦特(W);

P_{a0} —— 在被试电动机断开电源后, 驱动电机的输入功率, 单位为瓦特(W)。

11.6.3.4 负载杂散损耗的确定

11.6.3.4.1 转子电流 I_2 的近似值

分别求得取出转子试验(见 11.6.3.2)和反转试验(见 11.6.3.3.2 或 11.6.3.3.3)转子电流 I_2 的近似值, 单位为安培(A), 按公式(53)计算:

$$I_2 = \sqrt{I_1^2 - I_0^2} \dots\dots\dots(53)$$

式中:

I_1 —— 定子电流, 单位为安培(A);

I_0 ——试验电压下空载电流,单位为安培(A),由图 6 求取,见 9.3。

11.6.3.4.2 求取负载杂散损耗

分别绘制 $P_{sf} = f(I_2)$ 和 $P'_{sh} = f(I_2)$ 关系曲线,见图 8。从图 8 中查得对应于同一 I_2 的 P_{sf} 和 P'_{sh} 数值,则,被试电动机的负载杂散损耗 P_{LL} ,单位为瓦特(W),按照公式(54)计算:

$$P_{LL} = P'_{sh} + 2 P_{sf} \dots\dots\dots (54)$$

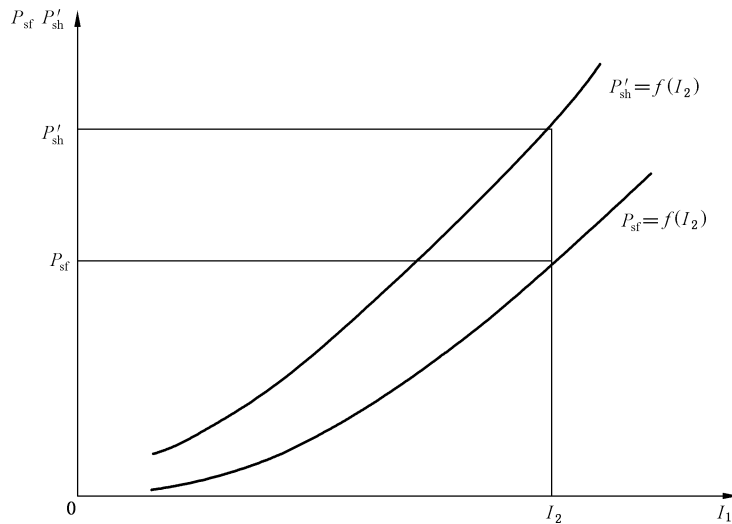


图 8 杂散损耗求取曲线

根据不同负载电流 I_1 ,按 11.6.3.4.1 中的规定求取相应的电流 I_2 ,从而确定不同负载(包括额定负载)下的负载杂散损耗。

11.6.3.5 绕线转子电动机负载杂散损耗的另一种直接测量法

在此方法中,转子通以直流电流励磁,定子绕组经电流表短接以读取定子电流,利用其他动力把转子驱动到同步转速,调节转子励磁,使定子绕组内电流达到要求确定负载杂散损耗的电流值。测量加励磁和不加励磁时驱动转子的机械功率(P_f 和 P_{f0})。

被试电动机的负载杂散损耗 P_{LL} ,单位为瓦特(W),按照公式(55)计算:

$$P_{LL} = P_f - P_{f0} - 1.5 \times I_1^2 \times R_1 \times \frac{K_1 + \theta_1}{K_2 + \theta_1} \dots\dots\dots (55)$$

式中:

R_1 —— 定子绕组初始(冷态)电阻,单位为欧姆(Ω),按 6.2.2.5 确定;

θ_1 —— 测量 R_1 时绕组温度,单位为摄氏度($^{\circ}\text{C}$),按 6.2.1 确定;

θ_1 —— 试验时测得的绕组温度,单位为摄氏度($^{\circ}\text{C}$);

I_1 —— 定子线电流,单位为安培(A);

P_f —— 加励磁时驱动转子的机械功率,单位为瓦特(W);

P_{f0} —— 不加励磁时驱动转子的机械功率,单位为瓦特(W)。



至少测取 6 个负载点读数,绘制出负载杂散损耗对定子绕组电流二次方的关系曲线,从曲线上确定额定负载杂散损耗 P_{LL} 。

11.6.4 推荐值法

额定负载的负载杂散损耗值 P_{LL} 应用图 9 中的曲线,按输入功率 P_1 的百分比确定。

曲线的数值按公式(56)、公式(57)或公式(58)表述:

对 $P_2 \leq 1 \text{ kW}$:

$$P_{LL} = P_1 \times 0.025 \quad \dots\dots\dots (56)$$

对 $1 \text{ kW} < P_2 < 10\,000 \text{ kW}$:

$$P_{LL} = P_1 \times \left[0.025 - 0.005 \log_{10} \left(\frac{P_2}{1 \text{ kW}} \right) \right] \quad \dots\dots\dots (57)$$

对 $P_2 \geq 10\,000 \text{ kW}$:

$$P_{LL} = P_1 \times 0.005 \quad \dots\dots\dots (58)$$

其他非额定负载点,应假定负载杂散损耗与定子电流二次方减去空载电流二次方之差成正比,即与 $(I_1^2 - I_0^2)/(I_N^2 - I_0^2)$ 成正比。

注:此曲线不代表平均值,而是大量试验值的上包络线,而且在大多数情况下,曲线给出的负载杂散损耗值可能比 11.6.2 或 11.6.3 得出的值大。 I_0 为额定电压时的空载电流,按 9.3 确定。

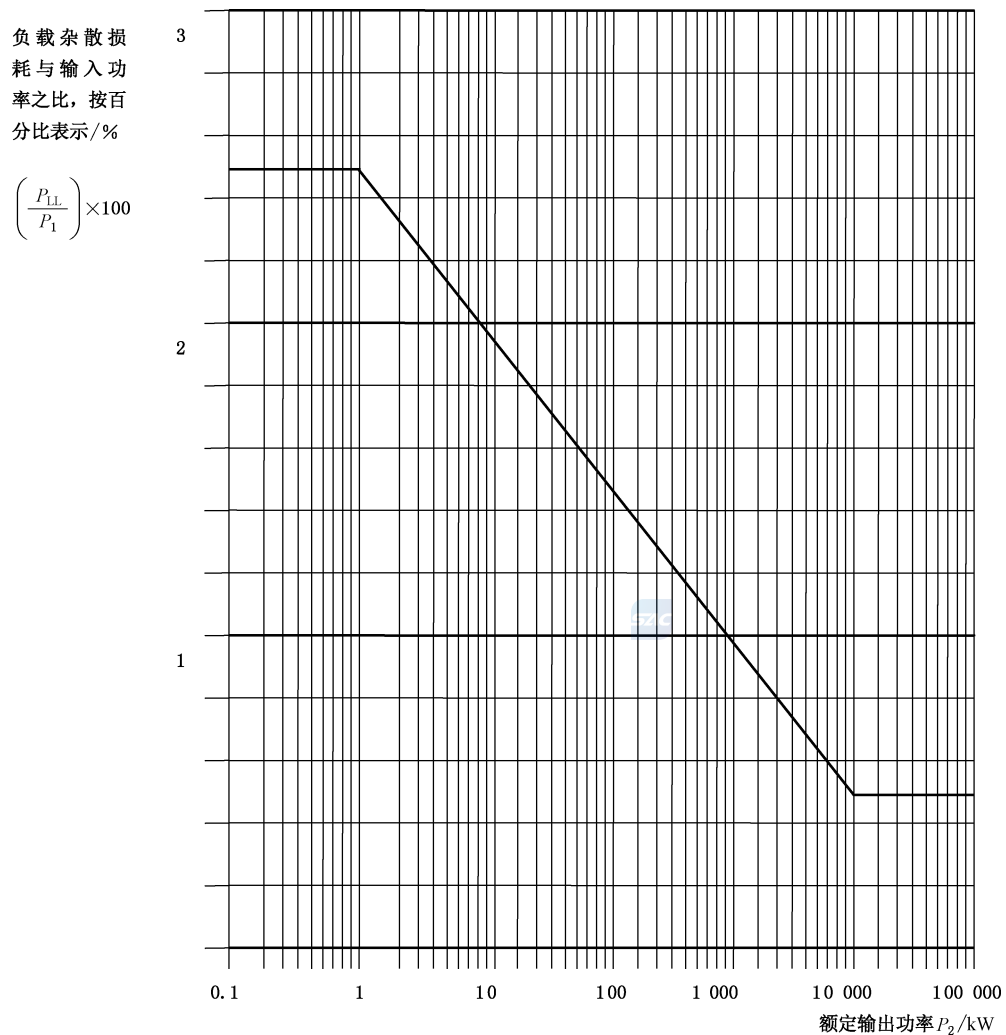


图9 负载杂散损耗的推荐值

11.6.5 成对电机对拖回馈法

见 12.4.3.3。

11.7 总损耗及输出功率的确定

11.7.1 总损耗

总损耗 P_T ,单位为瓦特(W),按公式(59)计算:

$$P_T = P_{s,\theta} + P_{r,\theta} + P_{fe} + P_{fw} + P_{LL} \quad \dots\dots\dots(59)$$

式中:

- $P_{s,\theta}$ ——规定温度下定子 I^2R 损耗,单位为瓦特(W);
- $P_{r,\theta}$ ——规定温度下转子 I^2R 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)。

11.7.2 输出功率

输出功率 P_2 ,单位为瓦特(W),按公式(60)计算:

$$P_2 = P_1 - P_T \quad \dots\dots\dots(60)$$

式中:

- P_1 ——输入功率,单位为瓦特(W);
- P_T ——总损耗,单位为瓦特(W)。

12 效率的确定

12.1 通则

12.1.1 效率

效率是以同一单位表示的输出功率 P_2 和输入功率 P_1 之比,通常以百分数表示。输出功率 P_2 等于输入功率 P_1 减去总损耗 P_T ,若已知3个变量(输入、总损耗和输出)中的两个,按公式(61)或公式(62)求取效率 η :

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \times 100\% \quad \dots\dots\dots(61)$$

$$\eta = \left(1 - \frac{P_T}{P_1}\right) \times 100\% \quad \dots\dots\dots(62)$$

除非另有规定,应在额定电压和额定频率下确定效率。若电压没有显著偏离额定值且符合5.2.1的要求,则由此求得的效率值是准确的。

12.1.2 直接法和间接法确定效率

确定效率的试验可归纳为下述三类。

- a) 直接测量单台电动机的输入-输出功率。包括测量电动机输入的电功率和输出的机械功率。
- b) 对两台完全相同的对拖电动机,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) 测量特定条件下电动机的实际损耗,一般不是指总损耗而是包含了各部分损耗分量。

确定电机效率的试验方法是基于若干假设条件的,因此,不宜对不同试验方法得到的效率值进行比较。

12.1.3 不确定度

本文件所述不确定度指确定效率真值的不确定度,反映了试验方法和试验设备的差异。

虽然不确定度值宜用数值来表示,但这个数值需要有足够多的试验来确定其具有代表性和可比较性。

12.1.4 优选方法和客户特定协议试验、现场试验、检查试验的方法

制定确定效率的详细规则是困难的,试验方法的选择基于所需的数据、所要求的精度、相关电动机的类型和规格以及现场可用的试验设备(电源和负载电机等)。

本文件将确定效率和各项损耗的试验方法分为优选方法和客户特定协议试验、现场试验、检查试验的方法。


本文件规定了两种不同的在其适用范围内为低不确定度的优选试验方法,见表4。

本文件规定的其他试验方法可用于任何试验,如,现场试验、客户特定协议试验和检查试验,见表5。

表4 优选试验方法

| 代号 | 方法 | 简述 | 章条号 | 适用范围 | 设备需求 |
|---|----------------|------------------|------|----------------------|-------------------------|
| B | 测量输入和输出功率损耗分析法 | 剩余损耗法确定 P_{LL} | 12.3 | 额定输出功率为 2 MW 及以下的电动机 | 1.25 倍满负载的测功机或带转矩测量的负载机 |
| G1 | 降低电压负载法 | 推荐值法确定 P_{LL} | 12.7 | 额定输出功率为 2 MW 以上的电动机 | — |
| 注 1: 优选方法也可用在其规定的范围以外。 注 2: 对于额定输出功率为 2 MW 以上的电动机,若现场试验设备允许,则宜采用 E1 法。 | | | | | |

表5 其他试验方法

| 代号 | 方法 | 简述 | 章条号 | 适用范围 | 设备需求 |
|----|--|-----------------|------|----------------------|-------------------------|
| A | 输入-输出法 | 测量转矩 | 12.2 | 额定输出功率为 1 kW 及以下的电动机 | 满负载的测功机或带转矩测量的负载机 |
| C | 成对电机双电源对拖回馈试验损耗分析法 | 回馈法确定 P_{LL} | 12.4 | — | 可达满负载的试验机组;完全相同的两台电机 |
| E |  测量输入功率的损耗分析法 | 反转法确定 P_{LL} | 12.5 | — | 额定功率不超过 5 倍被试电动机损耗的辅助电机 |
| E1 | | 推荐值法确定 P_{LL} | | | — |
| F | 等值电路法,由等值电路法确定电流、功率、转差率 | 反转法确定 P_{LL} | 12.6 | 中、大型电动机 | 额定功率不超过 5 倍被试电动机损耗的辅助电机 |
| F1 | | 推荐值法确定 P_{LL} | | | — |
| G | 降低电压负载法 | 反转法确定 P_{LL} | 12.7 | 中、大型电动机 | 额定功率不超过 5 倍被试电动机损耗的辅助电机 |
| H | 圆图法 | 推荐值法确定 P_{LL} | 12.8 | 中、大型电动机 | — |

12.1.5 确定大电机各项损耗的专用试验方法

当被试电动机负载或者规格超过 12.1.4 所述的试验能力时,按 GB/T 34861—2017 规定的试验方法进行试验,这些方法适用于满载试验无法实施的时候,其测试结果具有较高的不确定度。

注:当大型电动机采用其他方法试验时导致设备成本不经济时,采用以下方法进行试验:

- 校准电机法;
- 自减速法;
- 量热法。

12.2 A 法—输入-输出法



12.2.1 通则

A 法是由直接测得的输入的电功率和输出的机械功率,求得电动机的效率。此直观效率值与试验时的冷却介质温度值有关,因此,试验时环境温度宜在 15 °C ~ 30 °C 范围内。为提高测试结果的准确性和便于分析比较,用修正到基准冷却介质温度(25 °C)的输出功率和输入功率计算效率。

12.2.2 试验程序

12.2.2.1 定子绕组初始(冷态)端电阻的确定

被试电动机在冷却介质温度下测量并记录定子绕组端电阻 R_1 (按 6.2.2.5 确定)和绕组温度 θ_1 (按 6.2.1 确定)。

12.2.2.2 额定负载热试验

按 7.6 的规定进行试验,确定:

- 绕组工作温度 θ_w ,按 7.8 的规定;
- 热态端电阻 R_w ,按 7.8.2 的规定。

12.2.2.3 负载试验

按 8.2 的规定进行试验,测量并记录: U 、 f 、 I_1 、 P_1 、 n (或 s_1)、 T_t 、 θ_t (或 R_t)、 θ_a 。确定:

- 转矩修正值 T_c ,按 8.3 的规定;
- 轴转矩 T ,按 8.4 的规定。

12.2.2.4 空载试验

按 9.2 的规定进行试验,确定:

- 风摩耗 P_{fw} ,按 9.4 的规定;
- 铁耗 P_{fe} ,按 9.5 的规定。

12.2.3 计算

12.2.3.1 修正到基准冷却介质温度(25 °C)的输入功率

将试验温度下定子绕组 I^2R 损耗 P_s 和转子绕组 I^2R 损耗 P_r ,分别按公式(63)和公式(64)修正到基准冷却介质温度(25 °C)求得 P_{sc} 和 P_{rc} :

$$P_{sc} = P_s \times \frac{K_1 + 25}{K_1 + \theta_a} \dots\dots\dots (63)$$

$$P_{rc} = P_r \times \frac{K_2 + 25}{K_2 + \theta_a} \dots\dots\dots (64)$$

式中：

θ_a ——负载试验冷却介质温度，单位为摄氏度(°C)，见 8.2；

P_s ——试验温度下定子绕组 I^2R 损耗，单位为瓦特(W)，见 8.6；

P_r ——试验温度下转子绕组 I^2R 损耗，单位为瓦特(W)，见 8.8。

按公式(65)计算定子绕组 I^2R 损耗增量 ΔP_s ，按公式(66)计算转子绕组 I^2R 损耗增量 ΔP_r ：

$$\Delta P_s = P_s - P_{sc} \quad \dots\dots\dots(65)$$

$$\Delta P_r = P_r - P_{rc} \quad \dots\dots\dots(66)$$

再从输入功率中减去此两项增量，即得到修正到基准冷却介质温度(25 °C)的输入功率 P_{1c} ，单位为瓦特(W)，按公式(67)计算：

$$P_{1c} = P_1 - \Delta P_s - \Delta P_r \quad \dots\dots\dots(67)$$

式中：

P_1 ——输入功率，单位为瓦特(W)，见 8.2。

12.2.3.2 修正到基准冷却介质温度(25 °C)的输出功率

按公式(68)计算求得修正到基准冷却介质温度(25 °C)的转差 s_{tc} 。

$$s_{tc} = s_t \times \frac{K_2 + 25}{K_2 + \theta_a} \quad \dots\dots\dots(68)$$

式中：

s_t ——试验时测得(或求得)的转差，见 8.2；

θ_a ——负载试验冷却介质温度，单位为摄氏度(°C)，见 8.2。

将同步转速 n_s 减去 s_{tc} ，即得到修正到基准冷却介质温度(25 °C)的转速 n_c ，单位为转每分钟(r/min)，按公式(69)计算：

$$n_c = n_s - s_t \times \frac{K_2 + 25}{K_2 + \theta_a} \quad \dots\dots\dots(69)$$

根据 n_c 即可求得修正到基准冷却介质温度(25 °C)的输出功率 P_{2c} ，单位为瓦特(W)，按公式(70)计算：

$$P_{2c} = \frac{T \times n_c}{9.549} \quad \dots\dots\dots(70)$$

式中：

T ——轴转矩，单位为牛顿米(N·m)，见 8.4。

12.2.3.3 修正到基准冷却介质温度(25 °C)的效率

修正到基准冷却介质温度(25 °C)的效率 η 按公式(71)计算：

$$\eta = \frac{P_{2c}}{P_{1c}} \times 100\% \quad \dots\dots\dots(71)$$

12.2.3.4 功率因数

功率因数按公式(72)计算：

$$\cos\varphi = \frac{P_{1c}}{\sqrt{3}UI_1} \quad \dots\dots\dots(72)$$

式中：

P_{1c} ——修正到基准冷却介质温度(25 °C)的输入功率，单位为瓦特(W)；

U ——端电压测量值，单位为伏特(V)，见 8.2；

I_1 ——定子电流测量值，单位为安培(A)，见 8.2。

12.2.3.5 负载特性曲线

绘制定子电流 I_1 (A)、修正后输入功率 P_{1c} (W)、修正后的转速 n_c (r/min)、效率 η 及功率因数 $\cos\varphi$ 对修正后输出功率 P_{2c} (W) 的关系曲线。

12.2.3.6 指定负载点的特性参数

从负载特性曲线上求取 125%、115%、100%、75%、50% 和 25% 额定负载时的 I_1 (A)、 P_{1c} (W)、 n_c (r/min)、 η 和 $\cos\varphi$ 的值。

12.2.3.7 A 法计算格式

A 法计算格式见表 6。

表 6 A 法计算格式

| 序号 | 项目 | 数据来源或计算 | 负载点 | | | | | |
|----|--|---|-----|---|---|---|---|---|
| | | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| 1 | 定子绕组初始(冷态)端电阻 R_1/Ω | 见 12.2.2.1 | | | | | | |
| 2 | 测量 R_1 时绕组温度 $\theta_1/^\circ\text{C}$ | 见 12.2.2.1 | | | | | | |
| 3 | 定子绕组温度 $\theta_t/^\circ\text{C}$ | 见 12.2.2.3 | | | | | | |
| 4 | 负载试验冷却介质温度 $\theta_a/^\circ\text{C}$ | 见 12.2.2.3 | | | | | | |
| 5 | 端电压 U/V | 见 12.2.2.3 | | | | | | |
| 6 | 定子线电流 I_1/A | 见 12.2.2.3 | | | | | | |
| 7 | 输入功率 P_1/W | 见 12.2.2.3 | | | | | | |
| 8 | 频率 f/Hz | 见 12.2.2.3 | | | | | | |
| 9 | 同步转速 $n_s/(\text{r}/\text{min})$ | $(9) = 60 \times (8) / p$ | | | | | | |
| 10 | 实测转速 $n/(\text{r}/\text{min})$ | 见 12.2.2.3 或 $(10) = (9) - (11)$ | | | | | | |
| 11 | 实测转差 $s_t/(\text{r}/\text{min})$ | 见 12.2.2.3 或 $(11) = (9) - (10)$ | | | | | | |
| 12 | 转差率 s | $(12) = (11) / (9)$ | | | | | | |
| 13 | 修正到 25 °C 冷却介质温度的转差 $s_{tc}/(\text{r}/\text{min})$ | $(13) = (11) \times (K_2 + 25) / [K_2 + (4)]$ | | | | | | |
| 14 | 修正到 25 °C 冷却介质温度的转速 $n_c/(\text{r}/\text{min})$ | $(14) = (9) - (13)$ | | | | | | |
| 15 | 转矩读数 $T_t/(\text{N} \cdot \text{m})$ | 见 12.2.2.3 | | | | | | |
| 16 | 转矩读数修正值 $T_c/(\text{N} \cdot \text{m})$ | 见 12.2.2.3 | | | | | | |
| 17 | 轴转矩 $T/(\text{N} \cdot \text{m})$ | $(17) = (15) + (16)$ | | | | | | |
| 18 | 修正到 25 °C 冷却介质温度的输出功率 P_{2c}/W | $(18) = (17) \times (14) / 9.549$ | | | | | | |
| 19 | 铁耗 P_{fe}/W | 各负载点铁耗, 见 12.2.2.4 | | | | | | |
| 20 | 试验温度下定子绕组端电阻 R_t/Ω | $(20) = (1) \times [K_1 + (3)] / [K_1 + (2)]$ | | | | | | |
| 21 | 试验温度下定子绕组 I^2R 损耗 P_s/W | $(21) = 1.5 \times (6)^2 \times (20)$ | | | | | | |

表 6 A 法计算格式 (续)

| 序号 | 项目 | 数据来源或计算 | 负载点 | | | | | |
|----|---|--|-----|---|---|---|---|---|
| | | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| 22 | 修正到 25 °C 冷却介质温度定子绕组 I^2R 损耗 P_{sc}/W | $(22) = (21) \times (K_1 + 25) / [K_1 + (4)]$ | | | | | | |
| 23 | 定子绕组 I^2R 损耗增量 $\Delta P_s/W$ | $(23) = (21) - (22)$ | | | | | | |
| 24 | 试验温度下转子绕组 I^2R 损耗 P_r/W | $(24) = [(7) - (21) - (19)] \times (12)$ | | | | | | |
| 25 | 修正到 25 °C 冷却介质温度转子绕组 I^2R 损耗 P_{rc}/W | $(25) = (24) \times (K_2 + 25) / [K_2 + (4)]$ | | | | | | |
| 26 | 转子绕组 I^2R 损耗增量 $\Delta P_r/W$ | $(26) = (24) - (25)$ | | | | | | |
| 27 | 修正到 25 °C 冷却介质温度定子输入功率 P_{1c}/W | $(27) = (7) - (22) - (26)$ | | | | | | |
| 28 | 效率 η | $(28) = 100\% \times (18) / (27)$ | | | | | | |
| 29 | 功率因数 $\cos\varphi$ | $(29) = (27) / [\sqrt{3} \times (5) \times (6)]$ | | | | | | |

注：带括号数字指本表序号所指的参量。

12.3 B 法——测量输入和输出功率的损耗分析法

12.3.1 试验程序

12.3.1.1 定子绕组初始(冷态)端电阻的确定

被试电动机在冷却介质温度下测量并记录定子绕组端电阻 R_1 (按 6.2.2.5 确定) 和绕组温度 θ_1 (按 6.2.1 确定)。

12.3.1.2 额定负载热试验

按 7.6 的规定进行试验, 确定:

- 绕组工作温度 θ_w , 按 7.8 的规定;
- 热态端电阻 R_w , 按 7.8.2 的规定;
- 绕组规定温度 θ_s , 按 7.9.3 的 a)、b) 或 c) 规定。

12.3.1.3 负载试验

按 8.2 的规定进行试验, 测量并记录: U 、 f 、 I_1 、 P_1 、 n (或 s_t)、 T_t 、 θ_t (或 R_t)、 θ_a 。确定:

- 转矩修正值 T_c , 按 8.3 的规定;
- 轴转矩 T , 按 8.4 的规定。

12.3.1.4 空载试验

按 9.2 的规定进行试验, 确定:

- 风摩耗 P_{fw} , 按 9.4 的规定;
- 铁耗 P_{fe} , 按 9.5 的规定。

12.3.2 计算

12.3.2.1 各项损耗的确定

根据 12.3.1 规定的试验程序,求取各项损耗:

- 规定温度下定子绕组 I^2R 损耗,按 11.2 的规定;
- 规定温度下转子绕组 I^2R 损耗,按 11.3 的规定;
- 风摩耗,按 9.4 的规定;
- 铁耗,按 9.5 的规定;
- 负载杂散损耗,按 11.6.2 的规定。

12.3.2.2 总损耗

总损耗 P_T ,单位为瓦特(W),按公式(73)计算:

$$P_T = P_{s,0} + P_{r,0} + P_{fe} + P_{fw} + P_{LL} \quad \dots\dots\dots (73)$$

式中:

- $P_{s,0}$ ——规定温度下定子 I^2R 损耗,单位为瓦特(W),见 11.2;
- $P_{r,0}$ ——规定温度下转子 I^2R 损耗,单位为瓦特(W),见 11.3;
- P_{fe} ——铁耗,单位为瓦特(W),见 9.5;
- P_{fw} ——风摩耗,单位为瓦特(W),见 9.4;
- P_{LL} ——负载杂散损耗,单位为瓦特(W),见 11.6.2.5。

12.3.2.3 输出功率

输出功率 P_2 ,单位为瓦特(W),按公式(74)计算:

$$P_2 = P_1 - P_T \quad \dots\dots\dots (74)$$

式中:

- P_1 ——输入功率,单位为瓦特(W),见 8.2;
- P_T ——总损耗,单位为瓦特(W)。

12.3.2.4 效率

效率 η 按公式(75)计算:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \times 100\% \quad \dots\dots\dots (75)$$

12.3.2.5 功率因数

功率因数按公式(76)计算:

$$\cos\varphi = \frac{P_1}{\sqrt{3}UI_1} \quad \dots\dots\dots (76)$$

式中:

- P_1 ——输入功率,单位为瓦特(W),见 8.2;
- U ——端电压测量值,单位为伏特(V),见 8.2;
- I_1 ——定子电流测量值,单位为安培(A),见 8.2。

12.3.2.6 负载特性曲线

作定子电流 I_1 (A)、输入功率 P_1 (W)、修正到规定温度下的转速 n_c (r/min)(见 11.3.2)、效率 η 及

功率因数 $\cos\varphi$ 对修正后输出功率 P_2 (W) 的关系曲线。

12.3.2.7 指定负载点的特性参数

从负载特性曲线上求取 125%、115%、100%、75%、50% 和 25% 额定负载时的 I_1 (A)、 P_1 (W)、 n_c (r/min)、 η 和 $\cos\varphi$ 的值。

12.3.2.8 B 法计算格式

B 法计算格式见表 7。

表 7 B 法计算格式

| 序号 | 项目 | 数据来源或计算 |
|----|--|--|
| 1 | 定子绕组初始(冷态)端电阻 R_1/Ω | 见 12.3.1.1 |
| 2 | 测量 R_1 时绕组温度 $\theta_1/^\circ\text{C}$ | 见 12.3.1.1 |
| 3 | 额定负载热试验绕组工作温度 $\theta_w/^\circ\text{C}$ | 见 12.3.1.2 |
| 4 | 热试验冷却介质温度 $\theta_b/^\circ\text{C}$ | 见 12.3.1.2 |
| 5 | 负载试验绕组温度 $\theta_t/^\circ\text{C}$ | 见 12.3.1.3 |
| 6 | 负载试验冷却介质温度 $\theta_a/^\circ\text{C}$ | 见 12.3.1.3 |
| 7 | 规定温度 $\theta_s/^\circ\text{C}$ | (7) = (3) - (4) + 25 |
| 8 | 频率 f/Hz | 见 12.2.1.3 |
| 9 | 同步转速 $n_s/(\text{r}/\text{min})$ | (9) = $60 \times (8) / p$ |
| 10 | 转速 $n/(\text{r}/\text{min})$ | 见 12.3.1.3, 或 (10) = (9) - (11) |
| 11 | 转差 $s_t/(\text{r}/\text{min})$ | 见 12.3.1.3, 或 (11) = (9) - (10) |
| 12 | 转差率 s | (12) = (11) / (9) |
| 13 | 端电压 U/V | 见 12.3.1.3 |
| 14 | 定子线电流 I_1/A | 见 12.3.1.3 |
| 15 | 定子输入功率 P_1/W | 见 12.3.1.3 |
| 16 | 风摩耗 P_{fw}/W | 见 12.3.1.4 |
| 17 | 各负载点铁耗 P_{fe}/W | 见 12.3.1.4 |
| 18 | 试验温度(θ_t)下定子绕组 I^2R 损耗 P_s/W | (18) = $1.5 \times (14)^2 \times (1) \times [K_1 + (5)] / [K_1 + (2)]$ |
| 19 | 试验温度(θ_t)下转子绕组 I^2R 损耗 P_r/W | (19) = [(15) - (17) - (18)] \times (12) |
| 20 | 各负载点转矩读数 $T_t/(\text{N} \cdot \text{m})$ | 见 12.3.1.3 |
| 21 | 转矩读数修正值 $T_c/(\text{N} \cdot \text{m})$ | 见 12.3.1.3 |
| 22 | 轴转矩 $T/(\text{N} \cdot \text{m})$ | (22) = (20) + (21) |
| 23 | 轴功率 P_{mech}/W | (23) = (10) \times (22) / 9.549 |
| 24 | 剩余损耗 P_{Lr}/W | (24) = (15) - (23) - (16) - (17) - (18) - (19) |
| 25 | 截距 B | 见 11.6.2.4 |
| 26 | 斜率 A | 见 11.6.2.4 |
| 27 | 相关系数 r | 见 11.6.2.4 |

表 7 B 法计算格式 (续)

| 序号 | 项目 | 数据来源或计算 |
|---------------------|---|--|
| 28 | 负载杂散损耗 P_{LL}/W | (28) = (26) × (22)2 |
| 29 | 规定温度 (θ_S) 下定子绕组 I^2R 损耗 $P_{s,0}/W$ | (29) = $1.5 \times (14)^2 \times (1) \times [K_1 + (7)] / [K_1 + (2)]$ |
| 30 | 规定温度 (θ_S) 下转差 $s_{tc}/(r/min)$ | (30) = $(11) \times [K_2 + (7)] / [K_2 + (5)]$ |
| 31 | 规定温度 (θ_S) 下转速 $n_c/(r/min)$ | (31) = (9) - (30) |
| 32 | 规定温度 (θ_S) 下转差率 s_0 | (32) = (30) / (9) |
| 33 | 规定温度 (θ_S) 下转子绕组 I^2R 损耗 $P_{r,0}/(W)$ | (32) = $[(15) - (17) - (29)] \times (30) / (9)$ |
| 34 | 总损耗 $P_T/(W)$ | (33) = (16) + (17) + (28) + (29) + (33) |
| 35 | 输出功率 $P_2/(W)$ | (34) = (15) - (34) |
| 36 | 效率 η | (35) = $100\% \times (35) / (15)$ |
| 37 | 功率因数 $\cos\varphi$ | (30) = $(15) / [\sqrt{3} \times (13) \times (14)]$ |
| 注: 带括号数字指本表序号所指的参量。 | | |

12.4 C 法——成对电机双电源对拖回馈试验损耗分析法

12.4.1 通则

有两台完全相同的成对电机可用时,可用此法确定电机的效率。将两台电机耦接在一起。电气上接在两个电源上,其中一个为可调(电压、频率)电源。两个电源都应符合 5.2.1 的要求,应既能输出功率又能吸收功率。

为了分析叙述方便,接到额定频率电源的电机记为 M1,接到可调频、调压电源的电机记为 M2。

注: 对于绕线转子感应电动机,电气上接在同一电源上,施加额定转速和额定电压,一台作为电动机运行,另一台作为发电机运行。电动机的转子绕组短路,发电机的转子绕组连接至能提供转差频率下额定转子电流的多相电源,通过调节此电源的频率和电流达到所要求的电动机负载。

12.4.2 试验程序

12.4.2.1 定子绕组初始(冷态)端电阻的确定

M1 电机和 M2 电机在冷却介质温度下,分别测量并记录定子绕组端电阻 R_1 (按 6.2.2.5 确定) 和绕组温度 θ_1 (按 6.2.1 确定)。

12.4.2.2 空载试验

按 9.2 的规定进行试验,分别确定 M1 和 M2 电机的:

- 风摩耗 P_{fw} ,按 9.4 的规定;
- 铁耗 P_{fe} ,按 9.5 的规定。

12.4.2.3 加载试验

12.4.2.3.1 加载方法

两台电机耦接在一起,将 M1(被试)电机接到额定电压和额定频率电源上,M2(辅助)电机接到可调(电压、频率)的电源上。降低 M2 电机的供电电压和频率,给 M1 电机加负载。此时,M1 电机作为电

动机运行, M2 电机作为发电机运行。M2 电机端电压除以该电压的频率应保持等于其额定电压除以额定频率(称为额定压/频比)。

12.4.2.3.2 额定负载热试验

将 M1 电机加载到额定电流并按 7.6.2 规定进行热试验。

根据上述试验, 确定:

- 绕组工作温度 θ_w , 按 7.8 的规定;
- 热态端电阻 R_w , 按 7.8.2 的规定;
- 绕组规定温度 θ_s , 按 7.9.2 的 a)、b) 或 c) 规定。

12.4.2.3.3 负载特性试验

M1 电机分别作为电动机和发电机进行负载试验。

a) M1 作为电动机负载试验

M1 电机在额定电压和额定频率下运行, 降低 M2(辅助)电机的端电压和频率, 给 M1 电机加负载。在调节 M2 电机的端电压和频率时, 应保持压/频比为额定值。

试验从最大负载开始, 依次降到最小负载。试验应尽快完成以减少试验过程中温度变化对试验结果的影响。

在 25%~100% 额定负载之间, 按大致均匀分布取 4 个负载点(包括 100% 额定负载), 在大于 100% 但不超过 125% 额定负载之间取 2 个负载点。读取并记录 M1 电机在每个负载点的定子输入功率 P_1 、定子线电流 I_1 、端电压 U 、频率 f 、绕组温度 θ_t (或端电阻 R_t)、转速 n (或转差 s_t)、冷却冷却介质温度 θ_a 。同时读取并记录 M2 电机在该负载点的定子输出功率 P'_1 、线电流 I'_1 、端电压 U' 、绕组温度 θ'_t (或端电阻 R'_t)、电源频率 f' 。M2 与 M1 的转速相同, 但由于电源频率不同, 所以同步转速不同, 转差率不同。

b) M1 作为发电机负载试验

升高 M2 的电源频率和端电压(保持额定压/频比), 使 M2 作电动机运行。M1 仍保持在额定电压和额定频率下作发电机运行。

M1 作为发电机运行, 而 M2 作为电动机运行时, 测量仪表及互感器接线位置均不变。由于功率反向流动, 所有仪表的校正误差可减至最小。仪用互感器的相角误差是累积的, 精确校正相角误差是很重要的。因为这种误差会使所求得的损耗小于真实值。

测量并记录 M1 和 M2 试验数据, 测量和记录项目与本条 a) 相同。

12.4.3 计算

12.4.3.1 风摩擦

P_{fw} 按 12.4.2.2 确定。

12.4.3.2 铁耗

P_{fe} 按 12.4.2.2 确定。

12.4.3.3 负载杂散损耗(成对电机对拖回馈法)

12.4.3.3.1 M1 在电动机状态下负载杂散损耗

用 12.4.2.3.3 的 a) 测得的试验数据, 按下述方法求取 M1 在电动机状态下的负载杂散损耗。

- [1] 利用测得的电流值,计算在试验温度下每台电机的定子绕组 I^2R 损耗;
- [2] 利用测得的以同步转速表示的 M1 转差率计算 M1 机转子绕组 I^2R 损耗:
电动机转差率×(电动机输入功率—定子绕组 I^2R 损耗—铁耗)
- [3] 利用测得的以同步转速表示的发电机转差率计算 M2 转子绕组 I^2R 损耗:
发电机转差率×(发电机输出功率+定子绕组 I^2R 损耗+铁耗)
- [4] 由测得的总损耗(等于 M1 的输入功率与 M2 输出功率差值)减去两台电机的定子绕组 I^2R 损耗、转子绕组 I^2R 损耗、铁耗及风摩耗之和,即为两台电机的总杂散损耗。
- [5] 假定负载杂散损耗与转子电流二次方成比例,则,M1(被试电机)在电动机状态下的负载杂散损耗 P_{LL1} ,单位为瓦特(W),按公式(77)计算:

$$P_{LL1} = [4] \times \frac{[2]}{[2] + [3]} \dots\dots\dots (77)$$

12.4.3.3.2 M1 电机在发电机状态下负载杂散损耗

用 12.4.2.3.3 的 b)测得的试验数据,按 12.4.3.3.1 所述的方法,求取 M1 电机在发电机状态下的负载杂散损耗 P_{LL2} ,单位为瓦特(W),按公式(78)计算:

$$P_{LL2} = [4] \times \frac{[3]}{[2] + [3]} \text{ 或 } P_{LL2} = [4] - P_{LL1} \dots\dots\dots (78)$$

12.4.3.3.3 负载杂散损耗的平均值

取 M1 在电动机状态下(12.4.3.3.1)和发电机状态下(12.4.3.3.2)同一负载时的杂散损耗 P_{LL1} 和 P_{LL2} 的平均值作为该负载点负载杂散损耗的初值 P_{LL1a} ,同样,取 M2 在电动机状态下(12.4.3.3.1)和发电机状态下(12.4.3.3.2)同一负载时的杂散损耗 P_{LL1} 和 P_{LL2} 的平均值作为该负载点负载杂散损耗的初值 P_{LL2a} 。

取两项初值的平均值进行线性回归分析,此平均值为 P_{LLa} ,单位为瓦特(W),按公式(79)计算:

$$P_{LLa} = \frac{1}{2}(P_{LL1a} + P_{LL2a}) \dots\dots\dots (79)$$

12.4.3.3.4 同一负载点转子电流近似值的平均值

M1 在电动机状态时转子电流近似值 $I_{2(M)}$,单位为安培(A),按公式(80)计算:

$$I_{2(M)} = \sqrt{I_{1(M)}^2 - I_0^2} \dots\dots\dots (80)$$

式中:

$I_{1(M)}$ ——M1 在电动机状态时每一负载点定子电流,单位为安培(A),见 12.4.2.3.3 的 a);

I_0 ——额定电压空载电流(A),见 12.4.2.2。

M1 在发电状态时转子电流近似值 $I_{2(G)}$,单位为安培(A),按公式(81)计算:

$$I_{2(G)} = \sqrt{I_{1(G)}^2 - I_0^2} \dots\dots\dots (81)$$

式中:

$I_{1(G)}$ ——M1 在发电机状态时每一负载点定子电流,单位为安培(A),见 12.4.2.3.3 的 b);

I_0 ——额定电压空载电流(A),见 12.4.2.2。

转子平均电流 I_{2avg} ,单位为安培(A),按公式(82)计算:

$$I_{2avg} = \frac{1}{2}[I_{2(M)} + I_{2(G)}] \dots\dots\dots (82)$$

12.4.3.3.5 负载杂散损耗平均值的线性回归分析

P_{LLa} 与 I_{2avg}^2 呈线性关系,将 P_{LLa} 数据对 I_{2avg}^2 进行线性回归分析(按附录 C),得到回归方程如公式(83):

$$P_{LLa} = A \times I_{2\text{avg}}^2 + B \quad \dots\dots\dots(83)$$

式中:

A ——斜率;

B ——截距。

如果分析结果显示斜率 A 为负数或相关系数(按附录 C 求取) $\gamma < 0.9$, 剔除坏点后重新进行回归分析。如果斜率 A 为正且 $\gamma \geq 0.9$, 则用第二次回归分析结果。如果斜率 A 仍为负数或 $\gamma < 0.9$, 则试验不理想, 表明测试仪器或试验读数或两者都存在较大误差。宜调查分析并纠正误差源, 重新进行试验。

12.4.3.3.6 负载杂散损耗的计算

负载杂散损耗 P_{LL} , 单位为瓦特(W), 按公式(84)计算:

$$P_{LL} = A \times I_{2(M)}^2 \quad \dots\dots\dots(84)$$

式中:

$I_{2(M)}$ ——M1 作为电动机运行时的转子电流, 单位为安培(A), 见 12.4.3.3.4。

12.4.3.4 M1 在规定温度(θ_s)下定子绕组 I^2R 损耗

M1 在规定温度(θ_s)下定子绕组 I^2R 损耗 $P_{s,\theta}$, 单位为瓦特(W), 按公式(85)计算:

$$P_{s,\theta} = 1.5 \times I_1^2 \times R_1 \times \frac{K_1 + \theta_s}{K_1 + \theta_1} \quad \dots\dots\dots(85)$$

式中:

I_1 ——M1 作为电动机时各负载点的定子电流, 单位为安培(A), 见 12.4.2.3.3 的 a);

R_1 ——初始(冷态)端电阻, 单位为欧姆(Ω), 见 12.4.2.1;

θ_1 ——测量 R_1 时定子绕组温度, 单位为摄氏度($^{\circ}\text{C}$), 见 12.4.2.1;

θ_s ——规定温度, 单位为摄氏度($^{\circ}\text{C}$), 见 12.4.2.3.2。

12.4.3.5 M1 在规定温度(θ_s)下转子绕组 I^2R 损耗

M1 在规定温度(θ_s)下转子绕组 I^2R 损耗 $P_{r,\theta}$, 单位为瓦特(W), 按公式(86)计算:

$$P_{r,\theta} = (P_1 - P_{s,\theta} - P_{fe}) \times \frac{n_s - n}{n_s} \times \frac{K_2 + \theta_s}{K_2 + \theta_t} \quad \dots\dots\dots(86)$$

式中:

n_s ——同步转速, 单位为转每分(r/min), $n_s = 60 \times f / p$;

n ——各负载点实测转速, 单位为转每分(r/min), 见 12.4.2.3.3 的 a), 如实测转差 s_t , 则 $n = n_s - s_t$;

θ_t ——测量转速 n 时 M1 定子绕组温度, 单位为摄氏度($^{\circ}\text{C}$), 见 12.4.2.3.3 的 a);

θ_s ——规定温度, 单位为摄氏度($^{\circ}\text{C}$), 见 12.4.2.3.2;

P_1 ——M1 的定子输入功率, 单位为瓦特(W), 见 12.4.2.3.3 的 a);

$P_{s,\theta}$ ——M1 规定温度(θ_s)下定子绕组 I^2R 损耗, 单位为瓦特(W), 见 12.4.3.4;

P_{fe} ——M1 在各负载点的铁耗, 单位为瓦特(W), 见 12.4.3.2;

f ——M1 的电源频率, 单位为赫兹(Hz), 见 12.4.2.3.3 的 a)。

12.4.3.6 M1 总损耗

M1 的总损耗 P_T , 单位为瓦特(W), 按公式(87)计算:

$$P_T = P_{s,\theta} + P_{r,\theta} + P_{fe} + P_{fw} + P_{LL} \quad \dots\dots\dots(87)$$



式中：

$P_{s,\theta}$ ——规定温度下定子 I^2R 损耗,单位为瓦特(W),见 12.4.3.4;

$P_{r,\theta}$ ——规定温度下转子 I^2R 损耗,单位为瓦特(W),见 12.4.3.5;

P_{fe} ——铁耗,单位为瓦特(W),见 12.4.3.2;

P_{fw} ——风摩耗,单位为瓦特(W),见 12.4.3.1;

P_{LL} ——负载杂散损耗,单位为瓦特(W),见 12.4.3.3。

12.4.3.7 M1 的输出功率

M1 的输出功率 P_2 ,单位为瓦特(W),按公式(88)计算:

$$P_2 = P_1 - P_T \quad \dots\dots\dots(88)$$

式中：

P_1 ——输入功率,单位为瓦特(W),见 12.4.2.3.3a);

P_T ——总损耗,单位为瓦特(W)。

12.4.3.8 M1 的效率

M1 的效率 η 按公式(89)计算:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \times 100\% \quad \dots\dots\dots(89)$$

12.4.3.9 M1 的功率因数

M1 的功率因数按公式(90)计算:

$$\cos\varphi = \frac{P_1}{\sqrt{3}UI_1} \quad \dots\dots\dots(90)$$

式中：

P_1 ——输入功率,单位为瓦特(W),见 12.4.2.3.3a);

U ——端电压测量值,单位为伏特(V),见 12.4.2.3.3a);

I_1 ——定子电流测量值,单位为安培(A),见 12.4.2.3.3a)。

12.4.3.10 M1 的负载特性曲线

作定子电流 I_1 (A)、输入功率 P_1 (W)、修正到规定温度下的转速 n_c (r/min)(见 11.3.2)、效率 η 及功率因数 $\cos\varphi$ 对修正后输出功率 P_2 (W)的关系曲线。

12.4.3.11 C 法计算格式

C 法计算格式见表 8。

表 8 C 法计算格式

| 序号 | 项目 | M1 的数据来源或计算 |
|----|--|--------------|
| 1 | 定子绕组初始(冷态)端电阻 R_1/Ω | 见 12.4.2.1 |
| 2 | 测量 R_1 时绕组温度 $\theta_1/^\circ\text{C}$ | 见 12.4.2.1 |
| 3 | 绕组规定温度 $\theta_s/^\circ\text{C}$ | 见 12.4.2.3 |
| 4 | 热试验冷却介质温度 $\theta_b/^\circ\text{C}$ | 见 12.4.2.3.2 |

表 8 C 法计算格式 (续)

| 序号 | 项目 | M1 的数据来源或计算 |
|---------------------|---|--|
| 5 | 负载试验定子绕组温度 $\theta_1/^\circ\text{C}$ | 见 12.4.2.3.3a) |
| 6 | 负载试验冷却介质温度 $\theta_a/^\circ\text{C}$ | 见 12.4.2.3.3a) |
| 7 | 频率 f/Hz | 见 12.4.2.3.3a) |
| 8 | 同步转速 $n_s/(\text{r}/\text{min})$ | $(8)=60 \times (7)/p$ |
| 9 | 转速 $n/(\text{r}/\text{min})$ | 见 12.4.2.3.3a), 或 $(9)=(8)-(10)$ |
| 10 | 转差 $s_1/(\text{r}/\text{min})$ | 见 12.4.2.3.3a), 或 $(10)=(8)-(9)$ |
| 11 | 试验温度下 (θ_1) 转差率 s | $(11)=[(8)-(9)]/(8)$ 或 $(11)=(10)/(8)$ |
| 12 | 端电压 U/V | 见 12.4.2.3.3a) |
| 13 | 定子线电流 I_1/A | 见 12.4.2.3.3a) |
| 14 | 定子输入功率 P_1/W | 见 12.4.2.3.3a) |
| 15 | 风摩耗 P_{fw}/W | 见 12.4.3.1 |
| 16 | 各负载点铁耗 P_{fe}/W | 见 12.4.3.2 |
| 17 | 规定温度 (θ_s) 下的转差率 s_0 | $(17)=[(8)-(9)]/(8) \times [K_2+(3)]/[K_2+(5)]$ |
| 18 | 规定温度 (θ_s) 下定子绕组 I^2R 损耗 $P_{s,\theta}/\text{W}$ | $(18)=1.5 \times (13)^2 \times (1) \times [K_1+(3)]/[K_1+(2)]$ |
| 19 | 规定温度 (θ_s) 下转子绕组 I^2R 损耗 $P_{r,\theta}/\text{W}$ | $(19)=[(14)-(16)-(18)] \times (17)$ |
| 20 | 负载杂散损耗 P_{LL}/W | 见 12.4.3.3.6 |
| 21 | 总损耗 P_T/W | $(21)=(15)+(16)+(18)+(19)+(20)$ |
| 22 | 输出功率 P_2/W | $(22)=(14)-(21)$ |
| 23 | 效率 η | $(23)=100\% \times (22)/(14)$ |
| 24 | 功率因数 $\cos\varphi$ | $(24)=(14)/[\sqrt{3} \times (12) \times (13)]$ |
| 注: 带括号数字指本表序号所指的参量。 | | |

12.5 E 法或 E1 法——测量输入功率的损耗分析法

12.5.1 概述

测量定子输入功率,从输入功率中减去总损耗即为输出功率。总损耗等于规定温度下定子绕组 I^2R 损耗、规定温度下转子绕组 I^2R 损耗、铁耗、风摩耗及负载杂散损耗之和。

E 法与 E1 法的唯一区别是:E 法是通过反转法(见 11.6.3)确定负载杂散损耗,而 E1 法是按推荐值(见 11.6.4)确定负载杂散损耗。

12.5.2 试验程序

12.5.2.1 定子绕组初始(冷态)端电阻的确定

被试电动机在冷却介质温度下测量并记录定子绕组端电阻 R_1 (按 6.2.2.5 确定)和绕组温度 θ_1 (按 6.2.1 确定)。

12.5.2.2 额定负载热试验

按 7.6 的规定进行试验,确定:

- 绕组工作温度 θ_w ,按 7.8 的规定;
- 热态端电阻 R_w ,按 7.8.2 的规定;
- 绕组规定温度 θ_s ,按 7.9.3 的规定。

12.5.2.3 负载试验

按 8.2 的规定进行试验,测量并记录: U 、 f 、 I_1 、 P_1 、 n (或 s_1)、 θ_t (或 R_t)、 θ_a 。本方法试验时不需要测量被试电动机的输出转矩。

12.5.2.4 空载试验

按 9.2 的规定进行试验,确定:

- 风摩耗 P_{fw} ,按 9.4 的规定;
- 铁耗 P_{fe} ,按 9.5 的规定。



12.5.3 计算

12.5.3.1 各项损耗的确定

根据 12.5.2 规定的试验程序,求取各项损耗:

- 规定温度下定子绕组 I^2R 损耗,按 11.2 的规定;
- 规定温度下转子绕组 I^2R 损耗,按 11.3 的规定;
- 风摩耗,按 9.4 的规定;
- 铁耗,按 9.5 的规定;
- 负载杂散损耗,按 11.6.3(E 法)或 11.6.4(E1 法)的规定。

12.5.3.2 总损耗

总损耗 P_T ,单位为瓦特(W),按公式(91)计算:

$$P_T = P_{s,\theta} + P_{r,\theta} + P_{fe} + P_{fw} + P_{LL} \quad \dots\dots\dots(91)$$

式中:

- $P_{s,\theta}$ ——规定温度下定子 I^2R 损耗,单位为瓦特(W),见 11.2;
- $P_{r,\theta}$ ——规定温度下转子 I^2R 损耗,单位为瓦特(W),见 11.3;
- P_{fe} ——铁耗,单位为瓦特(W),见 9.5;
- P_{fw} ——风摩耗,单位为瓦特(W),见 9.4;
- P_{LL} ——负载杂散损耗,单位为瓦特(W),按 11.6.3(E 法)或 11.6.4(E1 法)的规定。

12.5.3.3 输出功率

输出功率 P_2 ,单位为瓦特(W),按公式(92)计算:

$$P_2 = P_1 - P_T \quad \dots\dots\dots(92)$$

式中:

- P_1 ——输入功率,单位为瓦特(W),见 8.2;
- P_T ——总损耗,单位为瓦特(W),见 12.5.3.2。

12.5.3.4 效率

效率 η 按公式(93)计算:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \times 100\% \quad \dots\dots\dots(93)$$

12.5.3.5 功率因数

功率因数按公式(94)计算:

$$\cos\varphi = \frac{P_1}{\sqrt{3}UI_1} \quad \dots\dots\dots(94)$$

式中:

P_1 ——输入功率,单位为瓦特(W),见 8.2;

U ——端电压测量值,单位为伏特(V),见 8.2;

I_1 ——定子电流测量值,单位为安培(A),见 8.2。

12.5.3.6 负载特性曲线

作定子电流 I_1 (A)、输入功率 P_1 (W)、修正到规定温度下的转速 n_c (r/min)(见 11.3.2)、效率 η 及功率因数 $\cos\varphi$ 对修正后输出功率 P_2 (W)的关系曲线。

12.5.3.7 E 法或 E1 法计算格式

E 法或 E1 法计算格式见表 9。

表 9 E 法或 E1 法计算格式

| 序号 | 项目 | 数据来源或计算 |
|----|---|--|
| 1 | 定子绕组初始(冷态)端电阻 R_1/Ω | 见 12.5.2.1 |
| 2 | 测量 R_1 时绕组温度 $\theta_1/^\circ\text{C}$ | 见 12.5.2.1 |
| 3 | 负载试验绕组温度 $\theta_t/^\circ\text{C}$ | 见 12.5.2.3 |
| 4 | 负载试验冷却介质温度 $\theta_s/^\circ\text{C}$ | 见 12.5.2.3 |
| 5 | 规定温度 $\theta_s/^\circ\text{C}$ | 见 12.5.2.2 |
| 6 | 频率 f/Hz | 见 12.5.2.3 |
| 7 | 同步转速 $n_s/(\text{r}/\text{min})$ | (7) = $60 \times (6) / p$ |
| 8 | 转速 $n/(\text{r}/\text{min})$ | 见 12.5.2.3, 或 (8) = (7) - (9) |
| 9 | 转差 $s_t/(\text{r}/\text{min})$ | (9) = (7) - (8), 或实测值, 见 12.5.2.3 |
| 10 | 转差率 s | (10) = (9) / (7) |
| 11 | 端电压 U/V | 见 12.5.2.3 |
| 12 | 定子线电流 I_1/A | 见 12.5.2.3 |
| 13 | 定子输入功率 P_1/W | 见 12.5.2.3 |
| 14 | 风摩耗 P_{fw}/W | 见 12.5.2.4 |
| 15 | 各负载点铁耗 P_{fe}/W | 见 12.5.2.4 |
| 16 | 规定温度(θ_s)下定子 I^2R 损耗 $P_{s,\theta}/\text{W}$ | (16) = $1.5 \times (12)^2 \times (1) \times [K_1 + (5)] / [K_1 + (2)]$ |

表 9 E 法或 E1 法计算格式 (续)

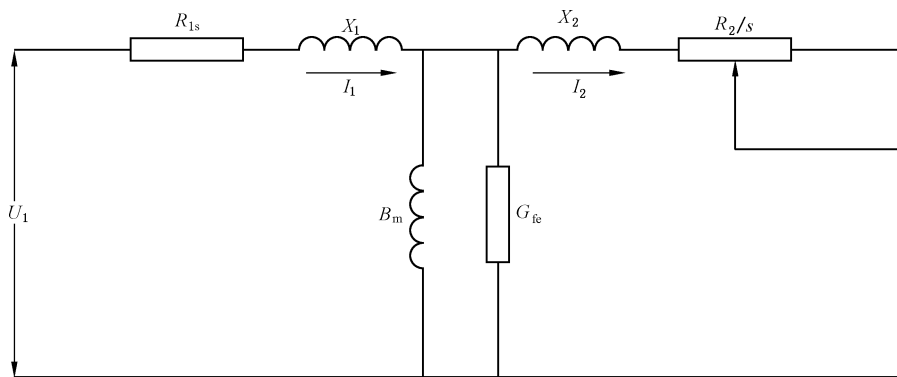
| 序号 | 项目 | 数据来源或计算 |
|----|--|---|
| 17 | 规定温度(θ_s)转差率 s_θ | (17) = (10) × [K ₂ + (5)] / [K ₂ + (3)] |
| 18 | 规定温度(θ_s)转速 n_c / (r/min) | (18) = (1 - (17)) × (7) |
| 19 | 规定温度(θ_s)下转子 I^2R 损耗 $P_{r,\theta}$ / W | (19) = [(13) - (16) - (15)] × (17) |
| 20 | 负载杂散损耗 P_{LL} / W | 见 12.5.3.1 |
| 21 | 总损耗 P_T / W | (21) = (14) + (15) + (16) + (19) + (20) |
| 22 | 输出功率 P_2 / W | (22) = (13) - (21) |
| 23 | 效率 η | (23) = 100% × (22) / (13) |
| 24 | 功率因数 $\cos\varphi$ | (24) = (13) / [√3 × (11) × (12)] |

注：带括号数字指本表序号所指的参量。

12.6 F 或 F1 法——等值电路法

12.6.1 通则

如不能进行负载试验,可依据图 10 所示等值电路求取电动机的运行特性(效率、功率因数、转速等)参数值。等值电路中的参数是用空载试验和阻抗试验得出的试验数据求得的,能否精确地预测正常运行范围内的特性,首先取决于电阻 R_2 与低频电流实际转子电阻的接近程度;其次取决于电抗 X_2 与低频电流实际转子漏抗的接近程度。因此,在确定低频转子特性的试验中有必要采取极为仔细的方法。



标引序号说明:

- U_1 ——相电压;
- R_{1s} ——定子相电阻;
- X_1 ——定子电抗;
- I_1 ——定子相电流;
- X_2 ——转子电抗;
- I_2 ——转子相电流;
- R_2/s ——折算到定子侧的转子相电阻;
- B_m ——励磁电纳;
- G_{fe} ——铁心电导。



图 10 等值电路图

F 法与 F1 法唯一的区别是, F 法是通过反转法(见 11.6.3)确定负载杂散损耗,而 F1 法是按推荐值(见 11.6.4)确定负载杂散损耗。

12.6.2 试验程序

12.6.2.1 定子绕组初始(冷态)端电阻的确定

被试电动机在冷却介质温度下测量并记录定子绕组端电阻 R_1 (按 6.2.2.5 确定)和绕组温度 θ_1 (按 6.2.1 确定)。

相电阻 R_U 、 R_V 、 R_W (Ω),按 6.2.2.6 的规定计算或按 6.2.3 测定。

12.6.2.2 空载试验

按 9.2 的规定进行试验,确定:

- 风摩耗 P_{fw} ,按 9.4 的规定;
- 铁耗 P_{fe} ,按 9.5 的规定。

12.6.2.3 低频堵转试验

在最大为 25%额定频率和额定电流下进行转子堵转阻抗试验。试验中,变频电源既可以是一套机组也可以是一台静止变频电源,均宜输出实际为正弦波的电流。

笼型电动机转子是一个对称的导电排绕组,因此,无论转子处于相对于定子的任何位置,电动机的阻抗实际上是相同的。绕线转子电动机的阻抗随转子相对于定子的位置变动而变化,故有必要进行预堵转试验以确定转子在某一位置时的阻抗为平均值。绕线转子电动机在测取读数之前,三相转子绕组输出端应短接。确定角位移的办法是使转子缓慢地转动,观察定子电流的变化。记录定子电流变化完成 1 个循环时转子应转过的角位移。定转子每极每相为整数槽的三相电动机,此角位移等于 $2/3$ 极距,每极每相为分数槽绕组的电动机,此角位移可大到整个极距。

绕线转子电动机的转子应堵住不能自由转动。逐步地增加所施加的电压,直到电流接近于额定值。读取和记录各相的电压、电流值,各相电压要平衡。保持同一电压值,慢慢地转动转子,记录在 1 个完整循环中电流的最大值和最小值。而后,把转子堵住在前面所记录的电流最大和最小之间平均值的位置,进行转子堵转阻抗试验。

- a) 在几个不同电压数值下,同时读取各相的电压、电流及输入功率。在定子电流接近额定电流处取值要特别注意,应同时记录定子绕组温度或电阻,注意不要使绕组过热,温度的上升不宜超过 5 K。试验从最大电流开始读数,依次读取至较低的电流读数。这样有助于均衡温度。
- b) 以电压作为横坐标,电流和输入功率为纵坐标绘制曲线,伏安曲线通常是一条直线,在高值处稍许上翘,若转子为闭口槽,低电压时曲线就清楚地上翘。从这些曲线上根据与所求电流值对应的输入功率和电压确定总电抗和转子电阻。

12.6.3 计算

12.6.3.1 求取等值电路参数所需要的数据

12.6.3.1.1 额定数据

求取等值电路参数所需要的额定数据如下:

- U_N ——额定电压,单位为伏特(V);
- I_1 ——额定电流,单位为安培(A);
- P_N ——额定功率,单位为瓦特(W);

f_N ——额定频率,单位为赫兹(Hz);

n_s ——同步转速,单位为转每分(r/min)。

注:本条计算中的电压、电流均为相电压和相电流的三相算术平均值;有功功率和无功功率均为三相值。

12.6.3.1.2 定子绕组相电阻

换算至规定温度(θ_s)的相电阻值 R_{1s} 。

注:本条计算中的电阻为相电阻的三相算术平均值。

12.6.3.1.3 对应额定电压时的空载试验数据

求取等值电路参数所需要的对应额定电压时的空载试验数据如下:

I_0 ——空载电流,单位为安培(A);

P_0 ——空载输入功率,单位为瓦特(W);

P_{fe} ——铁耗,单位为瓦特(W),按 9.5 确定;

P_{fw} ——风摩耗,单位为瓦特(W),按 9.4 确定;

R_{10} ——空载试验结束时的定子相电阻,单位为欧姆(Ω)。

12.6.3.1.4 低频堵转试验数据

求取等值电路参数所需要的低频堵转试验数据如下:

f_K ——堵转试验时的频率,单位为赫兹(Hz);

I_{1K} ——堵转试验时的电流,单位为安培(A);

U_{1K} ——堵转时的电压,单位为伏特(V);

P_{1K} ——堵转时的输入功率,单位为瓦特(W);

R_{1K} ——堵转试验结束时的定子相电阻,单位为欧姆(Ω);

θ_{1K} ——测电阻 R_{1K} 时绕组温度,单位为摄氏度($^{\circ}\text{C}$)。

12.6.3.1.5 负载杂散损耗

F 法按取出转子试验和反转试验(见 11.6.3)确定 P_{LL} ;

F1 法按推荐值法(见 11.6.4)确定 P_{LL} 。

12.6.3.1.6 定子和转子电抗的设计值

定子和转子电抗的设计值分别按公式(95)和公式(96)计算,单位为欧姆(Ω):

$$[X_1] = X_1^* \left(\frac{3 U_N^2}{P_N} \right) \dots\dots\dots (95)$$

$$[X_2] = X_2^* \left(\frac{3 U_N^2}{P_N} \right) \dots\dots\dots (96)$$

式中:

X_1^* 和 X_2^* ——定子和转子电抗的标么值(设计值)。

定子电抗和转子电抗的比值,按公式(97)计算:

$$\frac{[X_1]}{[X_2]} = \frac{[X_1]}{[X_2]} \dots\dots\dots (97)$$

励磁电抗的估算值按公式(98)计算,单位为欧姆(Ω):

$$[X_m] \approx \frac{U_N}{I_0} - [X_1] \dots\dots\dots (98)$$

定子电抗与励磁电抗估算值的比值按公式(99)计算:

$$\left[\frac{X_1}{X_m}\right] = \left[\frac{X_1}{X_m}\right] \dots\dots\dots(99)$$

12.6.3.2 等值电路参数的求取

下述求取等值电路参数的过程中,所有的转子参数,均折算至定子侧的值。

a) X_m 、 X_1 、 X_{1K} 近似值的求取

假定: $X_1 = [X_1]$; $\frac{X_1}{X_m} = \left[\frac{X_1}{X_m}\right]$; $\frac{X_1}{X_2} = \left[\frac{X_1}{X_2}\right]$,则,用设计值作为初始值分别按公式(100)、公式(102)

和公式(104)计算 X_m 、 X_{1K} 、 X_1 的近似值:

$$X_m = \frac{3 U_N^2}{P_{Q0} - 3 \times I_0^2 \times X_1} \times \frac{1}{\left(1 + \frac{X_1}{X_m}\right)^2} \dots\dots\dots(100)$$

式中:

P_{Q0} ——额定频率空载试验,电压等于额定电压时的无功功率,单位为乏(var),按公式(101)计算。

$$P_{Q0} = \sqrt{(3U_N I_0)^2 - P_0^2} \dots\dots\dots(101)$$

$$X_{1K} = \frac{P_{QK}}{3 \times I_{1K}^2 \times \left[1 + \left(\frac{X_1}{X_2}\right) + \left(\frac{X_1}{X_m}\right)\right]} \times \left[\left(\frac{X_1}{X_2}\right) + \left(\frac{X_1}{X_m}\right)\right] \dots\dots\dots(102)$$

式中:

P_{QK} ——低频堵转时的无功功率,单位为乏(var),按公式(103)计算。

$$P_{QK} = \sqrt{(3U_{1K} I_{1K})^2 - P_{1K}^2} \dots\dots\dots(103)$$

$$X_1 = \frac{f_N}{f_K} X_{1K} \dots\dots\dots(104)$$

b) 用迭代法求取 X_m 、 X_1 的精确值

利用已求得的 X_m 、 X_1 的近似值,重新计算 $\frac{X_1}{X_m}$,仍取 $\frac{X_1}{X_2} = \left[\frac{X_1}{X_2}\right]$,按本条 a)的公式计算 X_m 、 X_{1K} 及 X_1 ,不断重复此过程,直至求得的 X_m 和 X_1 相邻值变化小于 0.1% 为止。

c) 转子电抗 X_2 和励磁电纳 B_m 的求取

转子电抗 X_2 ,单位为欧姆(Ω),按公式(105)计算:

$$X_2 = \frac{f_N}{f_K} X_{2K} \dots\dots\dots(105)$$

式中:

X_{2K} 按公式(106)计算。

$$X_{2K} = \frac{X_{1K}}{\left[\frac{X_1}{X_2}\right]} \dots\dots\dots(106)$$

励磁电纳 B_m ,单位为西门子(S),按公式(107)计算:

$$B_m = \frac{1}{X_m} \dots\dots\dots(107)$$

d) 铁心电导 G_{fe} 的求取

铁心电导 G_{fe} ,单位为西门子(S),按公式(108)计算:

$$G_{fe} = \frac{P_{fe}}{3 U_N^2} \left(1 + \frac{X_1}{X_m}\right)^2 \dots\dots\dots(108)$$

铁心电阻 R_{fe} , 单位为欧姆(Ω), 按公式(109)计算:

$$R_{fe} = \frac{1}{G_{fe}} \dots\dots\dots (109)$$

e) 转子绕组相电阻 R_2 的求取

1) 转子绕组相电阻

每一个堵转阻抗试验点的未修正的转子绕组相电阻 R_{2K} , 单位为欧姆(Ω), 按公式(110)计算:

$$R_{2K} = \left(\frac{P_{1K}}{3 \times I_{1K}^2} - R_{1K} \right) \times \left(1 + \frac{X_2}{X_m} \right)^2 - \left(\frac{X_2}{X_1} \right)^2 X_{1K}^2 G_{fe} \dots\dots\dots (110)$$

2) 修正到规定温度(θ_s)下定子绕组相电阻 R_{1s} 的求取

修正到规定温度(θ_s)下定子绕组相电阻 R_{1s} , 单位为欧姆(Ω), 按公式(111)计算:

$$R_{1s} = R_{1K} \times \frac{K_1 + \theta_s}{K_1 + \theta_{1K}} \dots\dots\dots (111)$$

式中:

R_{1K} ——定子绕组相电阻, 单位为欧姆(Ω), 见 12.6.3.1.4;

θ_{1K} ——测量 R_{1K} 时绕组温度, 单位为摄氏度($^{\circ}\text{C}$), 见 12.6.3.1.4;

θ_s ——规定温度, 单位为摄氏度($^{\circ}\text{C}$), 按 7.9.3 确定。

3) 修正到规定温度(θ_s)下转子绕组相电阻 R'_{2ref} 的求取

修正到规定温度(θ_s)下转子绕组相电阻 R'_{2ref} , 单位为欧姆(Ω), 按公式(112)计算:

$$R'_{2ref} = R_{2K} \times \frac{K_2 + \theta_s}{K_2 + \theta_{1K}} \dots\dots\dots (112)$$

式中:

R_{2K} ——转子绕组相电阻, 单位为欧姆(Ω), 见本条 1);

θ_{1K} ——测量 R_{1K} 时绕组温度, 单位为摄氏度($^{\circ}\text{C}$), 见 12.6.3.1.4;

θ_s ——规定温度, 单位为摄氏度($^{\circ}\text{C}$), 按 7.9.3 确定。

4) 折算至定子侧的转子绕组相电阻 R_2 的求取

作 R'_{2ref} 对频率 f_K 的关系曲线。 $f_K = 0$ 时的截距即为折算至定子侧的转子绕组电阻 R_2 。

5) 绕线转子电动机转子绕组相电阻 R_2 的求取

绕线转子电动机转子绕组相电阻 R_2 , 单位为欧姆(Ω), 按公式(113)计算:

$$R_2 = R'_{2ref} K_U^2 \dots\dots\dots (113)$$

式中:

R'_{2ref} ——换算至规定温度的未折算至定子侧的转子相电阻, 单位为欧姆(Ω), 按公式(112)计算。

K_U ——变压比(转子绕组开路时, 定、转子绕组电压比, $K_U = U_{10} / U_{20}$)。

12.6.3.3 工作特性的求取

12.6.3.3.1 负载阻抗

转子阻抗 Z_2 , 单位为欧姆(Ω), 按公式(114)计算:

$$Z_2 = \sqrt{\left(\frac{R_2}{s} \right)^2 + X_2^2} \dots\dots\dots (114)$$

转子电导 G_2 , 单位为西门子(S), 按公式(115)计算:

$$G_2 = \frac{\frac{R_2}{s}}{Z_2^2} \dots\dots\dots (115)$$

转子电纳 B_2 , 单位为西门子(S), 按公式(116)计算:

$$B_2 = \frac{X_2}{Z_2^2} \dots\dots\dots (116)$$

转子与励磁回路电导 G , 单位为西门子(S), 按公式(117)计算:

$$G = G_2 + G_{fe} = \frac{R_2}{s Z_2^2} + \frac{1}{R_{fe}} \dots\dots\dots (117)$$

转子与励磁回路电纳 B , 单位为西门子(S), 按公式(118)计算:

$$B = B_2 + B_m = \frac{X_2}{Z_2^2} + \frac{1}{X_m} \dots\dots\dots (118)$$

转子与励磁回路导纳 Y , 单位为西门子(S), 按公式(119)计算:

$$Y = \sqrt{G^2 + B^2} = \sqrt{\left(\frac{R_2}{s Z_2^2} + \frac{1}{R_{fe}}\right)^2 + \left(\frac{X_2}{Z_2^2} + \frac{1}{X_m}\right)^2} \dots\dots\dots (119)$$

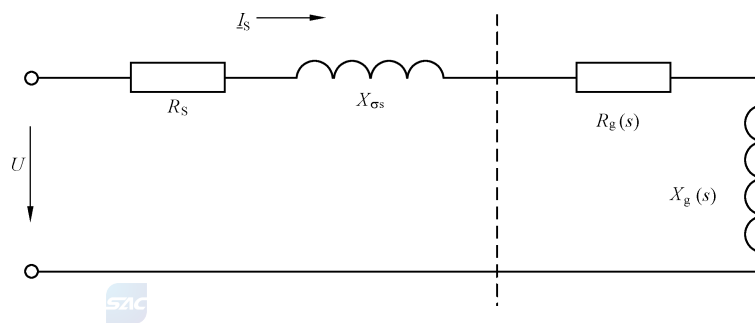


图 11 用于等值电路参数计算的简化模型

为了便于计算, 将等值电路简化, 模型图见图 11, 从输入端看合成总阻抗计算如下:

转子与励磁回路电阻 R_g , 单位为欧姆(Ω), 按公式(120)计算:

$$R_g = \frac{G}{Y^2} = \frac{\frac{R_2}{s Z_2^2} + \frac{1}{R_{fe}}}{Y^2} \dots\dots\dots (120)$$

转子与励磁回路电抗 X_g , 单位为欧姆(Ω), 按公式(121)计算:

$$X_g = \frac{B}{Y^2} = \frac{\frac{X_2}{Z_2^2} + \frac{1}{X_m}}{Y^2} \dots\dots\dots (121)$$

总电阻 R , 单位为欧姆(Ω), 按公式(122)计算:

$$R = R_g + R_{1s} \dots\dots\dots (122)$$

总电抗 X , 单位为欧姆(Ω), 按公式(123)计算:

$$X = X_g + X_1 \dots\dots\dots (123)$$

总阻抗 Z , 单位为欧姆(Ω), 按公式(124)计算:

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2} \dots\dots\dots (124)$$

12.6.3.3.2 电流和损耗

按下列步骤确定性能值:

定子相电流 I_1 , 单位为安培(A), 按公式(125)计算:

$$I_1 = \frac{U_N}{Z} \dots\dots\dots (125)$$

转子相电流 I_2 , 单位为安培(A), 按公式(126)计算:

$$I_2 = \frac{I_1}{Z_2 Y} \dots\dots\dots (126)$$

定子功率 P_1 , 单位为瓦特(W), 按公式(127)计算:

$$P_1 = 3 I_1^2 R \dots\dots\dots (127)$$

传递到转子的电磁功率 P_δ , 单位为瓦特(W), 按公式(128)计算:

$$P_\delta = 3 I_2^2 \frac{R_2}{s} \dots\dots\dots (128)$$

定子绕组 $I^2 R$ 损耗 P_s , 单位为瓦特(W), 按公式(129)计算:

$$P_s = 3 I_1^2 R_{1s} \dots\dots\dots (129)$$

铁耗 P_{fe} , 单位为瓦特(W), 按公式(130)计算:

$$P_{fe} = 3 I_1^2 \frac{G_{fe}}{Y^2} \dots\dots\dots (130)$$

转子绕组 $I^2 R$ 损耗 P_r , 单位为瓦特(W), 按公式(131)计算:

$$P_r = s P_\delta = 3 I_2^2 R_2 \dots\dots\dots (131)$$

风摩耗 P_{fw} , 单位为瓦特(W), 按 12.6.3.1.3 确定。

负载杂散损耗 P_{LL} , 单位为瓦特(W), 按公式(132)计算, 额定负载时的 $P_{LL,N}$ 按取出转子试验和反转试验(见 11.6.3)确定或按推荐值法(见 11.6.4)确定。

$$P_{LL} = P_{LL,N} \left(\frac{I_2}{I_{2,N}} \right)^2 \dots\dots\dots (132)$$

12.6.3.3.3 总损耗

总损耗 P_T , 单位为瓦特(W), 按公式(133)计算:

$$P_T = P_s + P_r + P_{fe} + P_{fw} + P_{LL} \dots\dots\dots (133)$$

12.6.3.3.4 输出功率

输出功率 P_2 , 单位为瓦特(W), 按公式(134)计算:

$$P_2 = P_1 - P_T \dots\dots\dots (134)$$

12.6.3.3.5 效率

效率 η 按公式(135)计算:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \times 100\% \dots\dots\dots (135)$$

12.6.3.3.6 功率因数

功率因数按公式(136)计算:

$$\cos\varphi = \frac{R}{Z} \dots\dots\dots (136)$$

12.6.3.3.7 工作特性曲线

同步转速 n_s , 单位为转每分(r/min), 按公式(137)计算:

$$n_s = 60 f_N / p \quad \dots\dots\dots (137)$$

转速 n , 单位为转每分(r/min), 按公式(138)计算:

$$n = n_s (1 - s) \quad \dots\dots\dots (138)$$

输出转矩 T , 单位为牛顿米(N·m), 按公式(139)计算:

$$T = 9.549 \times \frac{P_2}{n} \quad \dots\dots\dots (139)$$

产生最大转矩时的转差率 s_p , 按公式(140)计算, 电动机的最大转矩可用此转差率大约估算:

$$s_p = \frac{R_2}{\sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_2)^2}} \quad \dots\dots\dots (140)$$

a) 迭代法确定各负载点的参数

设某一负载点的输出功率为 P_m , 第一次假定的转差率 $s_{(1)}$, 算出的输出功率为 $P_{m(1)}$, 如果 $P_{m(1)}$ 不等于 P_m , 且二者之差大于 P_m 的 0.1%, 重新假设转差率 $s_{(2)}$, 按上述步骤重新计算, 直至算出的 $P_{m(2)}$ 与 P_m 之差小于 P_m 的 0.1% 为止。

$s_{(2)}$ 按公式(141)估算:

$$s_{(2)} = s_{(1)} \times \left[1 + \frac{P_m - P_{m(1)}}{P_m} \right] \quad \dots\dots\dots (141)$$

b) 绘制特性曲线

作 6 个负载点的定子电流 I_1 、输入功率 P_1 、效率 η 、功率因数 $\cos\varphi$ 及转速 n 对输出功率 P_2 的关系曲线。从曲线上查取指定负载时的工作参数。

12.6.3.4 F 法或 F1 法计算格式

F 法或 F1 法计算格式见表 10。

表 10 F 法或 F1 法计算格式

| 序号 | 项目 | 数据来源或计算 |
|----|---|---|
| 1 | 转差率 s | 每个负载点的假设值 |
| 2 | 修正到规定温度(θ_s)的转子电阻 R_2/Ω | 见 12.6.3.2e) R_2 值 |
| 3 | $R_2/s / \Omega$ | (3) = (2)/(1) |
| 4 | 转子电抗 X_2/Ω | 见 12.6.3.2c) X_2 值 |
| 5 | 转子阻抗的二次方 Z_2^2 | (5) = (3) ² + (4) ² |
| 6 | 转子电导 G_2/S | (6) = (3)/(5) |
| 7 | 铁心电导 G_{fe}/S | 见 12.6.3.2d) G_{fe} 值 |
| 8 | 转子与励磁回路电导 G/S | (8) = (6) + (7) |
| 9 | 转子电纳 B_2/S | (9) = (4)/(5) |
| 10 | 励磁电纳 B_m/S | 见 12.6.3.2c) B_m 值 |
| 11 | 转子与励磁回路电纳 B/S | (11) = (9) + (10) |
| 12 | 转子与励磁回路导纳 Y^2/S | (12) = (8) ² + (11) ² |
| 13 | 转子与励磁回路电阻 R_g/Ω | (13) = (8)/(12) |
| 14 | 修正到规定温度(θ_s)的定子绕组相电阻 R_{1s}/Ω | 见 12.6.3.2e) R_{1s} 值 |
| 15 | 总电阻 R/Ω | (15) = (13) + (14) |

表 10 F 法或 F1 法计算格式 (续)

| 序号 | 项目 | 数据来源或计算 |
|----|------------------------|--|
| 16 | 转子与励磁回路电抗 X_g/Ω | (16) = (11)/(12) |
| 17 | 定子电抗 X_1/Ω | 见 12.6.3.2b) 迭代法求得的 X_1 值 |
| 18 | 总电抗 X/Ω | (18) = (16) + (17) |
| 19 | 总阻抗 Z/Ω | (19) = $\sqrt{(15)^2 + (18)^2}$ |
| 20 | 定子电流 I_1/A | (20) = $U_N/(19)$ |
| 21 | 转子电流 I_2/A | (21) = (20)/ $\sqrt{(5) \times (12)}$ |
| 22 | 定子功率 P_1/W | (22) = $3 \times (20)^2 \times (15)$ |
| 23 | 电磁功率 P_e/W | (23) = $3 \times (21)^2 \times (3)$ |
| 24 | 定子 I^2R 损耗 P_s/W | (24) = $3 \times (20)^2 \times (14)$ |
| 25 | 铁耗 P_{fe}/W | (25) = $3 \times (20)^2 \times (7)/(12)$ |
| 26 | 转子 I^2R 损耗 P_r/W | (26) = (1) \times (23) |
| 27 | 风摩耗 P_{fw}/W | 见 12.6.2.2 |
| 28 | 负载杂散损耗 P_{LL}/W | F 法按 11.6.3; F1 法按 11.6.4 |
| 29 | 总损耗 P_T/W | (29) = (24) + (25) + (26) + (27) + (28) |
| 30 | 输出功率 P_2/W | (30) = (22) - (29) |
| 31 | 效率 η | (31) = $100\% \times (30)/(22)$ |
| 32 | 功率因数 $\cos\varphi$ | (32) = (15)/(19) |
| 33 | 同步转速 $n_s/(r/min)$ | (33) = $60f_N/p$ |
| 34 | 转速 $n/(r/min)$ | (34) = (33) \times [1 - (1)] |
| 35 | 转矩 $T/(N \cdot m)$ | (35) = $9.549 \times (30)/(34)$ |
| 36 | 产生最大转矩时的转差率 s_p | (36) = (2)/ $\sqrt{(14)^2 + ((4) + (17))^2}$ |

注：带括号数字指本表序号所指的参量。

12.7 G 法或 G1 法——降低电压负载法

12.7.1 通则

降低电压负载法是以各分项损耗求和法确定效率,额定功率 2 000 kW 以上的中、大型电动机通常难以进行满负载试验,因此,本方法采用降低电压负载试验确定效率,不要求进行满负载试验和负载曲线试验。本方法是假设当转速保持恒定时,随着电压的降低电动机的负载电流随电压同比减少,功率随电压的二次方减少。

需要进行下述试验:降低电压下以额定转速进行负载试验,同样的降低电压下空载试验,额定电压及额定频率下的空载试验。

G 法与 G1 法的唯一区别是:G 法是通过反转法(见 11.6.3)确定负载杂散损耗,而 G1 法是按推荐值(见 11.6.4)确定负载杂散损耗。

12.7.2 试验程序

12.7.2.1 定子绕组初始(冷态)端电阻的确定

被试电动机在冷却介质温度下测量并记录定子绕组端电阻 R_1 (按 6.2.2.5 确定) 和绕组温度 θ_1 (按 6.2.1 确定)。

12.7.2.2 空载试验

12.7.2.2.1 额定电压、额定频率空载试验

按 9.2 的规定进行试验, 确定:

- 风摩耗 P_{fw} , 按 9.4 的规定;
- (额定电压)铁耗 P_{fe} , 按 9.5 的规定。

12.7.2.2.2 降低电压、额定频率空载试验

测定降低电压为 U_r 时的空载电流 I_{or} 、输入功率 P_{or} 。

12.7.2.3 降低电压负载试验

被试电动机在额定频率, 1/2 额定电压和 1/2 额定电流下进行预热试验, 接近热稳定状态时, 保持额定频率和 1/2 额定电压不变。在空载电流至 0.6 倍额定电流范围内至少测取 6 点读数(大致均匀分布), 每点应读取并记录: 三相端电压 U_r (V), 三相线电流 I_{1r} (A), 输入功率 P_{1r} (W), 定子绕组温度 θ_t (°C)、转速 n (r/min) 或转差 s_t (r/min) 及频率 f (Hz)。测定完毕后迅速断电停机, 测量定子绕组端电阻。

12.7.3 计算

12.7.3.1 作 $P_{1r} = f(I_{1r})$ 和 $s_0 = f(I_{1r})$ 曲线

按 11.3.1 确定规定温度 θ_s (按 7.9.3 的规定) 下的转差率 s_0 , 并作 $P_{1r} = f(I_{1r})$ 和 $s_0 = f(I_{1r})$ 曲线 (见图 12)。

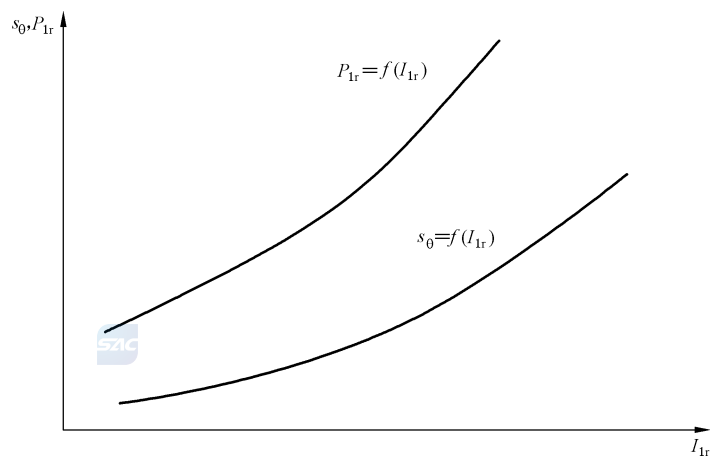


图 12 P_{1r} 和 s_0 对 I_{1r} 的关系曲线

12.7.3.2 各项损耗的确定

各项损耗求取如下。

a) 额定电压时的输入功率 P_1

假定定子电流 I_{1r} 为 1/2 额定电流,从图 12 中查取对应 I_{1r} 的输入功率 P_{1r} ,则额定电压时的输入功率 P_1 单位为瓦特(W),按公式(142)计算:

$$P_1 = P_{1r} \left(\frac{U_N}{U_r} \right)^2 \dots\dots\dots(142)$$

b) 额定电压且输入功率为 P_1 时定子电流 I_1

额定电压且输入功率为 P_1 时定子电流 I_1 ,单位为安培(A),按公式(143)计算:

$$I_1 = \sqrt{(I'_{1r})^2 + \Delta I_0^2 - 2 \times I'_{1r} \times \Delta I_0 \cos\left(\frac{\pi}{2} + \varphi_r\right)} \dots\dots\dots(143)$$

式中:

I'_{1r} ——根据假定算出的定子电流,单位为安培(A)按公式(144)计算;

ΔI_0 ——额定电压空载电流和降低电压空载电流的向量和,单位为安培(A),按公式(146)计算;

φ_r —— I'_{1r} 的相位角,单位为弧度(rad),按公式(145)计算。

$$I'_{1r} = I_{1r} \frac{U_N}{U_r} \dots\dots\dots(144)$$

$$\varphi_r = \arccos \frac{P_{01r}}{\sqrt{3} U_r I_{1r}} \dots\dots\dots(145)$$

$$\Delta I_0 = I_0 \sin \varphi_0 - I_{0r} \left(\frac{U_N}{U_r} \right) \sin \varphi_{0r} \dots\dots\dots(146)$$

式中:

φ_0 —— I_0 的相位角,单位为弧度(rad),按公式(147)计算;

φ_{0r} —— I_{0r} 的相位角,单位为弧度(rad),按公式(148)计算。

$$\varphi_0 = \arccos \frac{P_0}{\sqrt{3} U_N I_0} \dots\dots\dots(147)$$

$$\varphi_{0r} = \arccos \frac{P_{0r}}{\sqrt{3} U_r I_{0r}} \dots\dots\dots(148)$$

式中:

P_0 ——额定电压时的空载输入功率,单位为瓦特(W),见 12.7.2.2.1;

I_0 ——额定电压时的空载电流,单位为安培(A),见 12.7.2.2.1;

P_{0r} ——降低电压时的空载输入功率,单位为瓦特(W),见 12.7.2.2.2;

I_{0r} ——降低电压时的空载电流,单位为安培(A),见 12.7.2.2.2。

c) 额定负载时的转差率 s_θ

根据定子电流 I_{1r} [见 12.7.3.2a)]从图 12 中查取 s_θ 。

d) 各项损耗的计算

根据 12.7.2 规定的试验程序,求取各项损耗:

——规定温度下定子绕组 I^2R 损耗,按 11.2 的规定,定子电流 I_1 按本条的 b);

——规定温度下转子绕组 I^2R 损耗,按 11.3 的规定,转差率 s_θ 按本条的 c);

——风摩擦,按 9.4 的规定;

——铁耗,按 9.5 的规定;

——负载杂散损耗,G 法通过反转法(见 11.6.3)确定负载杂散损耗,G1 法按推荐值(见 11.6.4)确



定负载杂散损耗。

12.7.3.3 总损耗

总损耗 P_T , 单位为瓦特(W), 按公式(149)计算:

$$P_T = P_{s,\theta} + P_{r,\theta} + P_{fe} + P_{fw} + P_{LL} \quad \dots\dots\dots(149)$$

12.7.3.4 输出功率

输出功率 P_2 , 单位为瓦特(W), 按公式(150)计算:

$$P_2 = P_1 - P_T \quad \dots\dots\dots(150)$$

式中:

P_1 ——输入功率, 单位为瓦特(W), 见 12.7.3.2;

P_T ——总损耗, 单位为瓦特(W)。

如求得的输出功率 P_2 与额定功率 P_N 之差大于额定功率的 0.1%, 则应重新假设定子电流 I_{1r} [见 12.7.3.2a)], 重复计算 12.7.3.2~12.7.3.4 的值, 直至 P_2 与 P_N 之差小于 P_N 的 0.1% 为止。

12.7.3.5 额定功率时的效率

额定功率时的效率 η 按公式(151)计算:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \times 100\% \quad \dots\dots\dots(151)$$

12.7.3.6 功率因数

功率因数按公式(152)计算:

$$\cos\varphi = \frac{P_1}{\sqrt{3}U_N I_1} \quad \dots\dots\dots(152)$$

式中:

P_1 ——输入功率, 单位为瓦特(W), 见 12.7.3.2a);

I_1 ——定子电流计算值, 单位为安培(A), 见 12.7.3.2b)。

12.8 H 法——圆图法

12.8.1 概述

圆图法是根据电动机的空载试验和堵转试验数据, 利用圆图求取电动机额定功率时的效率、功率因数和转差率的一种方法。圆图法适用于不能进行负载试验的中、大型电动机。

圆图法计算公式中的电压、电流和电阻均为相电压(V)、相电流(A)和相电阻(Ω)的三相平均值, 功率为三相功率(W)。

12.8.2 绕线转子和普通笼型电动机的圆图法

12.8.2.1 试验程序

12.8.2.1.1 定子绕组初始(冷态)端电阻的确定

被试电动机在冷却介质温度下测量并记录定子绕组端电阻 R_1 (按 6.2.2.5 确定) 和绕组温度 θ_1 (按 6.2.1 确定)。

相电阻 R_U 、 R_V 、 R_W , 单位为欧姆(Ω), 按 6.2.2.6 的规定计算或按 6.2.3 测定。

12.8.2.1.2 空载试验

- 按 9.2 的规定进行试验,确定:
- 风摩耗 P_{fw} ,按 9.4 的规定;
 - 铁耗 P_{fe} ,按 9.5 的规定。

12.8.2.1.3 额定频率堵转试验

采用圆图计算法求取工作特性,堵转试验应在 1.0~1.1 倍 I_N 范围内的某一电流下进行。若采用圆图计算法求取最大转矩,堵转试验应在 2.0~2.5 倍 I_N 范围内的某一电流下进行。

对绕线转子电动机,由于在同一试验电流下,外施电压随转子位置不同而不同,此时,电动机应在电压为平均值的转子位置上进行堵转试验。

试验时,电源的频率应稳定,功率测量应按需要采用低功率因数功率表,其电压回路应接至被试电动机的出线端。被试电动机通电后,应迅速进行试验,并同时读取 U_K 、 I_K 和 P_K 。试验结束后,立即测量定子绕组和转子绕组(对绕线转子电动机)的端电阻。

其他要求同 10.1.1。

12.8.2.2 计算

12.8.2.2.1 圆图法所需参数

圆图法所需参数,计算如下。

- a) 定子绕组相电阻 R_{1S}
 换算至规定温度时的电阻值,单位为欧姆(Ω)。

- b) 转子绕组相电阻 R_{2ref} (对绕线转子电动机)
 按公式(153)计算折算至定子侧的转子绕组相电阻:

$$R_{2ref} = R'_{2ref} K_U^2 \dots\dots\dots (153)$$

式中:

R'_{2ref} ——换算至规定温度的未折算至定子侧的转子相电阻,单位为欧姆(Ω),见公式(112);
 K_U ——变压比(转子绕组开路时,定、转子绕组电压比, $K_U = U_{10}/U_{20}$)。

- c) 由空载试验求得的参数
 空载电流的有功分量 I_{0R} ,单位为安培(A),按公式(154)计算:

$$I_{0R} = \frac{P_0}{3U_N} \dots\dots\dots (154)$$

空载电流的无功分量 I_{0X} ,单位为安培(A),按公式(155)计算:

$$I_{0X} = \sqrt{I_0^2 - I_{0R}^2} \dots\dots\dots (155)$$

- d) 由额定频率堵转试验求得的参数
 等值阻抗 Z_K ,单位为欧姆(Ω),按公式(156)计算:

$$Z_K = \frac{U_K}{I_K} \dots\dots\dots (156)$$

等值电阻 R_K ,单位为欧姆(Ω),按公式(157)计算:

$$R_K = \frac{P_K}{3 I_K^2} \dots\dots\dots (157)$$

等值电抗 X_K ,单位为欧姆(Ω),按公式(158)计算:

$$X_K = \sqrt{Z_K^2 - R_K^2} \quad \dots\dots\dots (158)$$

再分别按公式(159)或公式(160)计算出参数 R 的数值,按公式(161)和公式(162)计算 X 和 Z 的值:

对 130(B)级绝缘:

$$R = R_K \quad \dots\dots\dots (159)$$

对 155(F)、180(H)及 200(N)级绝缘:

$$R = 1.13R_K \quad \dots\dots\dots (160)$$

$$X = X_K \quad \dots\dots\dots (161)$$

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2} \quad \dots\dots\dots (162)$$

e) 由额定频率堵转试验求得堵转电流的参数

堵转电流值 I_{KN} ,单位为安培(A),按公式(163)计算:

$$I_{KN} = \frac{U_N}{Z} \quad \dots\dots\dots (163)$$

堵转电流的有功分量 I_{KR} ,单位为安培(A),按公式(164)计算:

$$I_{KR} = I_{KN} \frac{R}{Z} \quad \dots\dots\dots (164)$$

堵转电流的无功分量 I_{KX} ,单位为安培(A),按公式(165)计算:

$$I_{KX} = I_{KN} \frac{X}{Z} \quad \dots\dots\dots (165)$$

12.8.2.2.2 功率因数和转差率的求取

额定功率 P_N 时的功率因数及转差率按下列步骤求取。

按公式(166)、公式(167)和公式(168)分别计算出 K 、 H 和 I_{2K} :

$$K = I_{KR} - I_{0R} \quad \dots\dots\dots (166)$$

$$H = I_{KX} - I_{0X} \quad \dots\dots\dots (167)$$

$$I_{2K} = \sqrt{H^2 + K^2} \quad \dots\dots\dots (168)$$

由 $\tan\alpha = \frac{H}{K}$ 求出 α 、 $\cos\alpha$ 、 $\sin\alpha$,再按公式(169)~公式(180)逐步计算出定子电流的有功分量 I_{1R} 和无功分量 I_{1X} :

$$K_3 = I_{2K}^2 \frac{R_{1S}}{U_N} \quad \dots\dots\dots (169)$$

$$K_2 = K - K_3 \text{ (对普通笼型电动机)} \quad \dots\dots\dots (170)$$

$$K_2 = \frac{K_3 R_{2\text{ref}}}{R_{1S}} \text{ (对绕线转子电动机)} \quad \dots\dots\dots (171)$$

$$I_R = \frac{P_N + P_{LL}}{3U_N} \quad \dots\dots\dots (172)$$

$$a = \frac{I_{2K}}{2} - I_R \cos\alpha \quad \dots\dots\dots (173)$$

$$b = a - \sqrt{a^2 - I_R^2} \quad \dots\dots\dots (174)$$

$$b_1 = b \cos\alpha \quad \dots\dots\dots (175)$$

$$b_2 = b \sin\alpha \quad \dots\dots\dots (176)$$

$$c = \frac{b_1 K_2}{K} \quad \dots\dots\dots (177)$$

$$d = c + I_R \dots\dots\dots (178)$$

$$I_{1R} = I_{0R} + b_1 + I_R \dots\dots\dots (179)$$

$$I_{1X} = I_{0X} + b_2 \dots\dots\dots (180)$$

则, 定子电流 I_1 , 单位为安培(A), 按公式(181)计算:

$$I_1 = \sqrt{I_{1R}^2 + I_{1X}^2} \dots\dots\dots (181)$$

功率因数 $\cos\varphi$, 按公式(182)计算:

$$\cos\varphi = \frac{I_{1R}}{I_1} \dots\dots\dots (182)$$

转差率 s , 按公式(183)计算:

$$s = \frac{c}{d} \dots\dots\dots (183)$$

12.8.2.2.3 损耗及效率的确定

根据 12.8.2.1 规定的试验程序, 求取各项损耗:

- 规定温度下定子绕组 I^2R 损耗, 按 11.2 的规定, 定子电流 I_1 按 12.8.2.2.2 的规定;
- 规定温度下转子绕组 I^2R 损耗 $P_{r,\theta}$, 单位为瓦特(W), 按公式(184)计算;
- 风摩耗, 按 12.8.2.1.2 的规定;
- 铁耗, 按 12.8.2.1.2 的规定;
- 负载杂散损耗, 按推荐值(见 11.6.4)确定。

$$P_{r,\theta} = \frac{s(P_N + P_{fw} + P_{LL})}{1 - s} \dots\dots\dots (184)$$

总损耗 P_T , 单位为瓦特(W), 按公式(185)计算:

$$P_T = P_{s,\theta} + P_{r,\theta} + P_{fe} + P_{fw} + P_{LL} \dots\dots\dots (185)$$

额定功率时的效率 η 按公式(186)计算:

$$\eta = \frac{P_N}{P_N + P_T} \times 100\% \dots\dots\dots (186)$$

12.8.3 深槽和双笼电动机的圆图法



12.8.3.1 试验程序

12.8.3.1.1 定子绕组初始(冷态)端电阻的确定

被试电动机在冷却介质温度下测量并记录定子绕组端电阻 R_1 (按 6.2.2.5 确定) 和绕组温度 θ_1 (按 6.2.1 确定)。

相电阻 R_U, R_V, R_W , 单位为欧姆(Ω), 按 6.2.2.6 的规定计算或按 6.2.3 测定。

12.8.3.1.2 空载试验

按 9.2 的规定进行试验, 确定:

- 风摩耗 P_{fw} , 按 9.4 的规定;
- (额定电压)铁耗 P_{fe} , 按 9.5 的规定。

12.8.3.1.3 额定频率和 1/2 额定频率堵转试验

额定频率堵转试验方法及要求按 12.8.2.1.3 的规定。1/2 额定频率堵转试验时的堵转电流及试验要求与 12.8.2.1.3 相同。

12.8.3.2 计算

12.8.3.2.1 圆图法所需参数

圆图法所需参数,计算如下。

- a) 定子绕组相电阻 R_{1S}

换算至规定温度时的电阻值,单位为欧姆(Ω)。

- b) 由空载试验求得的参数

空载电流的有功分量 I_{0R} ,单位为安培(A),按公式(187)计算:

$$I_{0R} = \frac{P_0}{3U_N} \dots\dots\dots (187)$$

空载电流的无功分量 I_{0X} ,单位为安培(A),按公式(188)计算:

$$I_{0X} = \sqrt{I_0^2 - I_{0R}^2} \dots\dots\dots (188)$$

- c) 由额定频率堵转试验求得的参数

等值阻抗 Z'_K ,单位为欧姆(Ω),按公式(189)计算:

$$Z'_K = \frac{U'_K}{I'_K} \dots\dots\dots (189)$$

等值电阻 R'_K ,单位为欧姆(Ω),按公式(190)计算:

$$R'_K = \frac{P'_K}{3 I'^2_K} \dots\dots\dots (190)$$

等值电抗 X'_K ,单位为欧姆(Ω),按公式(191)计算:

$$X'_K = \sqrt{Z'^2_K - R'^2_K} \dots\dots\dots (191)$$

- d) 由 $\frac{1}{2}$ 额定频率堵转试验求得的参数

等值阻抗 Z''_K ,单位为欧姆(Ω),按公式(192)计算:

$$Z''_K = \frac{U''_K}{I''_K} \dots\dots\dots (192)$$

等值电阻 R''_K ,单位为欧姆(Ω),按公式(193)计算:

$$R''_K = \frac{P''_K}{3 I''^2_K} \dots\dots\dots (193)$$

等值电抗 X''_K ,单位为欧姆(Ω),按公式(194)计算:

$$X''_K = \sqrt{Z''^2_K - R''^2_K} \dots\dots\dots (194)$$

- e) 修正后参数 R 、 X 、 Z 的值

$$h = \frac{2 X''_K - X'_K}{R'_K - R''_K} \dots\dots\dots (195)$$

$$m = \frac{4 + h^2}{3} \dots\dots\dots (196)$$

再分别按公式(197)或公式(198)计算出参数 R 的数值,按公式(199)和公式(200)计算 X 和 Z 的值:

对 130(B)级绝缘:

$$R = R'_K - m(R'_K - R''_K) \dots\dots\dots (197)$$

对 155(F)、180(H)及 200(N)级绝缘:

$$R = 1.13 \times [R'_{\text{K}} - m(R'_{\text{K}} - R''_{\text{K}})] \quad \dots\dots\dots (198)$$

$$X = X'_{\text{K}} + m(2X''_{\text{K}} - X'_{\text{K}}) \quad \dots\dots\dots (199)$$

式中, m 按公式(196)计算。

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2} \quad \dots\dots\dots (200)$$

f) 由额定频率堵转试验求得堵转电流的参数

堵转电流值 I_{KN} , 单位为安培(A), 按公式(201)计算:

$$I_{\text{KN}} = \frac{U_{\text{N}}}{Z} \quad \dots\dots\dots (201)$$

堵转电流的有功分量 I_{KR} , 单位为安培(A), 按公式(202)计算:

$$I_{\text{KR}} = I_{\text{KN}} \frac{R}{Z} \quad \dots\dots\dots (202)$$

堵转电流的无功分量 I_{KX} , 单位为安培(A), 按公式(203)计算:

$$I_{\text{KX}} = I_{\text{KN}} \frac{X}{Z} \quad \dots\dots\dots (203)$$

12.8.3.2.2 功率因数和转差率的求取

额定功率 P_{N} 时的功率因数及转差率按下列步骤求取:

按公式(204)、公式(205)和公式(206)分别计算出 K 、 H 和 $I_{2\text{K}}$:

$$K = I_{\text{KR}} - I_{0\text{R}} \quad \dots\dots\dots (204)$$

$$H = I_{\text{KX}} - I_{0\text{X}} \quad \dots\dots\dots (205)$$

$$I_{2\text{K}} = \sqrt{H^2 + K^2} \quad \dots\dots\dots (206)$$

由 $\tan\alpha = \frac{H}{K}$ 求出 α 、 $\cos\alpha$ 、 $\sin\alpha$, 再按公式(207)~公式(217)逐步计算出定子电流的有功分量 $I_{1\text{R}}$ 和

无功分量 $I_{1\text{X}}$:

$$K_3 = I_{2\text{K}}^2 \frac{R_{1\text{S}}}{U_{\text{N}}} \quad \dots\dots\dots (207)$$

$$K_2 = K - K_3 \quad \dots\dots\dots (208)$$

$$I_{\text{R}} = \frac{P_{\text{N}} + P_{\text{LL}}}{3U_{\text{N}}} \quad \dots\dots\dots (209)$$

$$a = \frac{I_{2\text{K}}}{2} - I_{\text{R}} \cos\alpha \quad \dots\dots\dots (210)$$

$$b = a - \sqrt{a^2 - I_{\text{R}}^2} \quad \dots\dots\dots (211)$$

$$b_1 = b \cos\alpha \quad \dots\dots\dots (212)$$

$$b_2 = b \sin\alpha \quad \dots\dots\dots (213)$$

$$c = \frac{b_1 K_2}{K} \quad \dots\dots\dots (214)$$

$$d = c + I_{\text{R}} \quad \dots\dots\dots (215)$$

$$I_{1\text{R}} = I_{0\text{R}} + b_1 + I_{\text{R}} \quad \dots\dots\dots (216)$$

$$I_{1\text{X}} = I_{0\text{X}} + b_2 \quad \dots\dots\dots (217)$$

则, 定子电流 I_1 , 单位为安培(A), 按公式(218)计算:

$$I_1 = \sqrt{I_{1\text{R}}^2 + I_{1\text{X}}^2} \quad \dots\dots\dots (218)$$

功率因数 $\cos\varphi$, 按公式(219)计算:

$$\cos\varphi = \frac{I_{1R}}{I_1} \dots\dots\dots (219)$$

转差率 s , 按公式(220)计算:

$$s = \frac{c}{d} \dots\dots\dots (220)$$

12.8.3.2.3 损耗及效率的确定

根据 12.8.3.1 规定的试验程序, 求取各项损耗:

- 规定温度下定子绕组 I^2R 损耗, 按 11.2 的规定, 定子电流 I_1 按 12.8.3.2.2 的规定;
- 规定温度下转子绕组 I^2R 损耗 $P_{r,0}$, 单位为瓦特(W), 按公式(221)计算;
- 风摩耗, 按 12.8.3.1.2 的规定;
- 铁耗, 按 12.8.3.1.2 的规定;
- 负载杂散损耗, 按推荐值(见 11.6.4)确定。

$$P_{r,0} = \frac{s(P_N + P_{fw} + P_{LL})}{1 - s} \dots\dots\dots (221)$$

总损耗 P_T , 单位为瓦特(W), 按公式(222)计算:

$$P_T = P_{s,0} + P_{r,0} + P_{fe} + P_{fw} + P_{LL} \dots\dots\dots (222)$$

额定功率时的效率 η 按公式(223)计算:

$$\eta = \frac{P_N}{P_N + P_T} \times 100\% \dots\dots\dots (223)$$

13 其他试验项目

13.1 转矩转速特性试验

13.1.1 通则

转矩转速特性是电动机的转矩和转速之间的关系, 涵盖范围从零到同步转速。当以曲线表达时, 这个关系包括了最大转矩、最小转矩以及堵转转矩。对于绕组转子电动机, 试验时集电环应短路。

电流转速特性是电动机的电流和转速之间的关系, 这个曲线常常与转矩转速特性曲线一起对共同比例的转速绘制在同一个图中。

13.1.2 试验程序

13.1.2.1 通则

本条所述的任何一种方法均可用于获取转矩转速特性曲线所需的数据, 可以根据被试电动机的大小、转矩转速特性以及设备来选择试验方法。试验过程中, 电源频率宜保持恒定。

试验完毕, 将试验结果修正至规定的电压(见 13.1.5), 然后绘制转矩和电流对转速的曲线。

13.1.2.2 方法 1——测量输出法

将一台已校正过的直流发电机或一台预先测定过损耗的直流发电机或与被试电动机用联轴器联接, 通过改变直流电机上的负载来控制被试电动机在每个测试点的转速。被试电动机接线端连接至额定频率的交流电源, 在不过热的情况下, 电压宜尽可能高, 如有可能至少为额定电压的 50%, 被试验电动机的电压应在其出线端上测量。

- a) 校正过的直流电机

直流电机可在发电机状态下用准确度不低于 0.5 级的测功机校正或用损耗分析法校正。校正时，在所需的各种转速下，待剩磁稳定后保持励磁电流不变，测取电枢电流 I_a 与轴上转矩 T_d 的校正曲线 $T_d = f(I_a)$ 。试验时，直流电机的转向和励磁电流与校正时相同。

试验过程中，励磁电流应保持不变。逐渐增加被试电动机的负载至校正过直流电机的电枢电流出现最大值，读取此数值和被试电动机的端电压，需同时读取转速值。

按试验时的转速和直流电机的电枢电流 I_a ，从直流电机的校正曲线 $T_d = f(I_a)$ 上求得每个测试点对应的转矩 T ，单位为牛顿米(N·m)。

b) 测定过损耗的直流发电机

在约 1/3 同步转速至能达到的最高转速之间取读数，读取数据时转速宜恒定，以免加速或减速功率影响结果。在每个速度点读取电动机的电压、电流和转速，并读取直流发电机的电枢电压和电流及励磁电流，注意不要使电动机过热。

在低转差时转速的测量精度尤为重要，所有测试点，仪表一经稳定则宜快速读数，不用等待显示中的缓慢蠕变消失。

电动机输出的总功率是发电机的输出和损耗的总和。各试验点的转矩 T ，用公式(224)计算：

$$T = \frac{9.549(P_{GO} + P_{GL})}{n} \dots\dots\dots(224)$$

式中：

- T —— 转矩，单位为牛顿米(N·m)；
- P_{GO} —— 直流发电机的输出，单位为瓦特(W)；
- P_{GL} —— 直流发电机的损耗(包括风摩擦)，单位为瓦特(W)；
- n —— 电动机的转速，单位为转每分(r/min)。

13.1.2.3 方法 2——直接测量法

当电动机以测功机或机械制动器等方式在各转速进行加载，直接测取转矩和电流，在每个转速下，同时读取电压、电流、转速以及转矩。试验应在尽可能接近额定电压下进行，若采用降低电压，则转矩和电流值应修正至规定电压(见 13.1.5)。

建议在被试电动机转速上升和下降的情况下测取两条转矩转速特性曲线，每条曲线的描绘时间应不少于 15 s。取两条曲线上分别求得的最大转矩值的平均值，作为被试验电动机的最大转矩值。最小转矩值取由堵转到空载的曲线(电动机转速上升曲线)上，处于 0 至最大转矩对应的转速范围内的转矩最小值，通常，最小转矩点附近的一段区域内曲线波动较大，应取其平均值作为最小转矩值。

试验过程中，应防止被试电动机过热而影响测量的准确性，因此测量用时不应过长，一般每条曲线不超过 20 s。被试电动机的端电压应在其出线端上测量。

13.1.2.4 方法 3——加速度法

加速度法中，电动机从空载启动，并确定各不同转速下的加速度值，每个速度下的转矩由旋转部件质量的加速确定。精确测量转速和加速度是本方法的基本要求。

根据选用的进行测试的设备来确定使用的加速度和试验持续时间，任何情况下，加速时间宜足够长，以便有足够的时间来读取每个点的数据。

当电动机从静止加速到接近同步转速时，同步读取一个线电压、一个线电流、转速及以秒为单位的时间。加速阶段宜至少读取五组数据，然而，如果可能的话宜读取更多的数据。

本试验中，可以根据最大转矩区域的转速变化率来确定最大转矩值，使用较低的外施电压或者在电动机轴上耦合合适的惯量能够更好地确定最大转矩值。

各转速点的转矩 T ，根据加速度用公式(225)计算：



$$T = \frac{J}{9.549} \times \frac{dn}{dt} \dots\dots\dots (225)$$

式中:

T —— 转矩,单位为牛顿米(N·m);

J —— 旋转部件转动惯量,单位为千克二次方米(kg·m²);

$\frac{dn}{dt}$ —— 每个转速下的加速度,单位为转每秒[(r/min)/s]。

13.1.2.5 方法4——测量输入法

本方法中,根据输入功率减去电动机的损耗来确定转矩,可用于对其他方法进行有益的检查,特别是当电机不能卸载从而根据加速度来确定转矩时尤为有利。事实上,由于不能便捷地确定实际运行条件下的定子损耗,因此本方法只能是近似的,而且,对于有大量的或正或负不易估算的谐波转矩的特殊电动机,本方法也会导致误差。

除了电动机不用卸载,其余按照 13.1.2.4 所述来启动电动机,将读取的输入数据对转速读数作曲线,线电压、线电流、功率及转速对时间作曲线,其中应包括堵转试验中(见 10.1.2)零转速读数时的平均值,并修正至读取其他数据时的电压值。

各转速点的转矩 T ,根据输入功率用公式(226)计算:

$$T = \left[\left(\frac{9.549}{n_s} \right) \times \left(P_1 - P_s - P_{fe} - P_{sf} - P_{sh} \times \sqrt{\frac{n}{n_s}} \right) \right] - T_{fw} \dots\dots\dots (226)$$

式中:

T —— 转矩,单位为牛顿米(N·m);

P_1 —— 定子输入功率,单位为瓦特(W);

P_s —— 试验电流时的定子绕组 I^2R 损耗,单位为瓦特(W),见 11.2;

P_{fe} —— 试验电压时的铁耗,单位为瓦特(W),见 11.5;

P_{sf} —— 试验电流时的基频负载杂散损耗,单位为瓦特(W),见 11.6.3.2;

P_{sh} —— 试验电流时的高频负载杂散损耗,单位为瓦特(W),见 11.6.3.3;

n —— 试验转速,单位为转每分(r/min);

n_s —— 同步转速,单位为转每分(r/min);

T_{fw} —— 试验转速时电动机的风摩转矩,单位为牛顿米(N·m)。

若基频负载杂散损耗 P_{sf} 无法得到,可以假定 $P_{sf} = P_{sh}$ 。若负载杂散损耗($P_{sf} + P_{sh}$)已从测功机试验中确定,则总的负载杂散损耗值可以用作高频负载杂散损耗的值;或者,用 11.6.3 所列方法确定基频负载杂散损耗的值,然后可以用负载杂散损耗的值减去基频负载杂散损耗的值即可确定高频负载杂散损耗的值。

13.1.3 最大转矩的圆图计算法

13.1.3.1 通则

如限于设备,对立式和 100 kW 以上的电动机,允许采用圆图计算法求取最大转矩。此时,电动机应按 12.8.2.1.3 的规定进行堵转试验。

圆图计算法公式中的电压、电流和电阻为相电压(V)、相电流(A)和相电阻(Ω)的三相平均值;功率为三相功率值(W)。

13.1.3.2 圆图计算法所需参数

圆图法所需参数,计算如下。

a) 定子绕组相电阻 R_{1S}

换算至规定温度时的电阻值,单位为欧姆(Ω)。

b) 由空载试验求得的参数

空载电流的有功分量 I_{0R} ,单位为安培(A),按公式(227)计算:

$$I_{0R} = \frac{P_0 - P_{fe}}{3U_N} \dots\dots\dots (227)$$

空载电流的无功分量 I_{0X} ,单位为安培(A),按公式(228)计算:

$$I_{0X} = \sqrt{I_0^2 - I_{0R}^2} \dots\dots\dots (228)$$

c) 由额定频率堵转试验求得堵转电流的参数

堵转电流值 I_{KN} ,单位为安培(A),按公式(229)计算:

$$I_{KN} = I_K \frac{U_N}{U_K} \dots\dots\dots (229)$$

堵转功率 P_{KN} ,单位为瓦特(W),按公式(230)计算:

$$P_{KN} = P_K \left(\frac{U_N}{U_K} \right)^2 \dots\dots\dots (230)$$

堵转电流的有功分量 I_{KR} ,单位为安培(A),按公式(231)计算:

$$I_{KR} = \frac{P_{KN}}{3U_N} \dots\dots\dots (231)$$

堵转电流的无功分量 I_{KX} ,单位为安培(A),按公式(232)计算:

$$I_{KX} = \sqrt{I_{KN}^2 - I_{KR}^2} \dots\dots\dots (232)$$

13.1.3.3 最大转矩的求取

首先按照公式(233)~公式(240)逐步计算出最大转矩倍数 K_T :

$$K = I_{KR} - I_{0R} \dots\dots\dots (233)$$

$$H = I_{KX} - I_{0X} \dots\dots\dots (234)$$

$$r = \frac{1}{2} \left(H + \frac{K^2}{H} \right) \dots\dots\dots (235)$$

$$I_{2K} = \sqrt{H^2 + K^2} \dots\dots\dots (236)$$

$$K_3 = I_{2K}^2 \frac{R_{1S}}{U_N} \dots\dots\dots (237)$$

由 $\tan\beta = \frac{H}{K_3}$ 求出 β 、 $\tan \frac{\beta}{2}$:

$$T = 3rU_N \tan \frac{\beta}{2} \dots\dots\dots (238)$$

$$P_\delta = \frac{P_N + P_{fw} + P_{LL}}{1 - s} \dots\dots\dots (239)$$

$$K_T = \frac{C_T \times T}{P_\delta} \dots\dots\dots (240)$$

式中:

C_T ——对 10 kW 及以上的笼型电动机,取 $C_T=0.9$;对绕线转子电动机和小于 10 kW 的笼型电动机,取 $C_T=1.0$ 。

则,最大转矩 T_{max} ,单位为牛顿米($N \cdot m$),按公式(241)计算:

$$T_{max} = K_T T_N \dots\dots\dots (241)$$



式中：

T_N ——额定转矩，单位为牛顿米(N·m)。

13.1.4 最大转矩的等值电路算法

采用等值电路法确定效率时，最大转矩可以根据转差率 s_p 求取，见 12.6.3.3.7。

13.1.5 降低电压试验时数据的修正

13.1.5.1 按近似比例修正

当需要根据降低电压下的转矩转速、电流转速以及堵转试验来确定额定电压下的电流值和转矩值的时候，作为近似值，电流按与电压成正比的关系来修正，而转矩按与电压的二次方成正比的关系来修正。

注：当试验电压在 0.95~1.05 倍额定电压范围内时，试验电压下的电流和转矩按此法修正至额定电压。

例如，额定电压下的最小转矩 T_{\min} 按公式(242)求取，单位为牛顿米(N·m)：

$$T_{\min} = T_{\min t} \left(\frac{U_N}{U_t} \right)^2 \quad \dots\dots\dots (242)$$

式中：

$T_{\min t}$ ——在试验电压 U_t 下测得的最小转矩，单位为牛顿米(N·m)；

U_N ——被试验电动机的额定电压，单位为伏特(V)；

U_t ——测得 $T_{\min t}$ 时的试验电压，单位为伏特(V)。

13.1.5.2 按对数曲线修正

另一更准确的方法是，可以根据需要进行试验来确定电流和转矩随电压的变化比例，至少确立 3 个电压值下的转矩转速曲线、电流转速曲线以及堵转转矩和电流值。降低电压下试验点绘制在对数曲线上，并用最小二乘法拟合曲线以最大精度修正到额定电压。

当试验电压 U_t 低于 0.9 倍额定电压时，应在 1/3~2/3 额定电压范围内，均匀测取 3 个不同电压下的试验数据，然后作对数曲线并求出对应于额定电压时的值。例如，用试验确定 3 个不同的降低电压下的最小转矩，作 $\lg T_{\min t} = f(\lg U_t)$ 曲线，并延长曲线，求出对应于额定电压时的最小转矩 T_{\min} 。

13.2 转动惯量的测定

13.2.1 悬挂转子摆动法

13.2.1.1 单钢丝法

采用单钢丝扭转摆动比较法测定电动机转子的转动惯量。

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，以便能用下式较准确地计算出假转子的转动惯量 J' 。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 $l \geq 0.5$ 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'_p ($T'_p = N/t$)。被试电动机转子在相同的条件下，重复上述试验，按上方法求得其摆动周期的平均值 T_p ，按下式计算被试电动机的转动惯量 J 。

假转子的转动惯量 J' ，单位为千克二次方米($\text{kg} \cdot \text{m}^2$)，按公式(243)计算：

$$J' = \frac{m D^2}{8} \quad \dots\dots\dots (243)$$

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)。

被试电动机转子的转动惯量 J ，单位为千克二次方米($\text{kg} \cdot \text{m}^2$)，按公式(244)计算：

$$J = J' \frac{T_p^2}{T_p'^2} \dots\dots\dots (244)$$

式中：

T_p ——被试电动机转子的摆动周期平均值，单位为秒(s)；

T_p' ——假转子的摆动周期平均值，单位为秒(s)。

13.2.1.2 双钢丝法

用两根平行的钢丝将被试电动机转子悬挂起来，使其转轴中心线与地面垂直。扭转转子使其产生以轴线为中心的摆动。转轴中心线的扭角应不大于 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_p 。

转动惯量 J ，单位为千克二次方米($\text{kg} \cdot \text{m}^2$)，按公式(245)计算：

$$J = \frac{T_p^2 a^2}{l} \times \frac{mg}{(4\pi)^2} \dots\dots\dots (245)$$

式中：

g ——重力加速度，单位为米每二次方秒(m/s^2)；

a ——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 ——被试电动机转子的质量，单位为千克(kg)。

13.2.2 空载减速法

此法用于测定功率为 100 kW 以上电动机的转动惯量。

试验时，使被试电动机的转速升高并超过同步转速，然后，切断电源或脱开驱动机械，在 1.1~0.9 倍同步转速范围内，测定转速变化 Δn (r/min)所需的时间 Δt (s)。转动惯量 J ，单位为千克二次方米($\text{kg} \cdot \text{m}^2$)，按公式(246)计算：

$$J = \frac{3\,600 \times P_{fw} \times \Delta t}{4\pi^2 n_s \Delta n} \dots\dots\dots (246)$$

13.2.3 辅助摆锤法

此法用于测定具有滚动轴承的电动机的转动惯量。

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动机转轴端面中心上，摆锤臂杆应与轴线成直角。当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的偏移应不大于 15° ，在开始摆动后，测量 2~3 次摆动所需的时间，求出摆动周期的平均值 T_p 。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 ，单位为千克二次方米($\text{kg} \cdot \text{m}^2$)，按公式(247)计算：

$$J = m \cdot r \left(\frac{T_p^2 g}{4\pi^2} - r \right) \dots\dots\dots (247)$$

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_P ——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 的电动机,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。

对绕线转子电动机和交流换向器电动机,试验应在电刷全部提起时进行。

13.3 短时过转矩试验

短时过转矩试验应在额定电压、额定频率下进行。

试验时,电动机在热状态下,逐渐增加负载,使其过转矩至少达到额定转矩的 60%,历时 15 s。在试验中,被试电动机不产生转速突变或停转等异常情况。

S9 工作制的电动机应能承受按该工作制规定的短时过转矩。为了近似地确定因电流损耗而引起的温度变化,可利用等效热时间常数,见 GB/T 755—2019 的 8.8。

对要求高转矩(如起重用)的特定用途电动机,其过转矩能力按协议。

对特殊设计以保证起动电流小于 4.5 倍额定电流的笼型电动机,其过转矩值可能低于 60%,但不低于 50%,或根据协议。

对具有特殊启动特性的特殊电动机,例如用于变频调速电动机或由静止变流电源供电的电动机其过转矩数值应按协议。

对于绕线转子电动机,过转矩值应为额定值的 35%。

对于其他电动机,短时过转矩值及时间依据协议。

如限于设备,允许在试验时用测量定子电流代替转矩的测量,此时,定子电流值应等于 1.1 倍的过转矩倍数乘以额定电流值。

13.4 匝间绝缘耐冲击电压试验

如需进行此项试验,按 GB/T 22715—2016 和 GB/T 22719.1—2008 规定的方法进行。

13.5 工频耐电压试验

13.5.1 试验要求

试验要求如下。

- a) 工频耐电压试验在电动机静止的状态下进行。试验前,应先测量绕组的绝缘电阻。如需要进行超速和短时过转矩试验时,该项试验应在这些试验之后进行,型式试验时,该项试验还应在热试验后电动机接近热状态下进行。
- b) 耐电压试验应为工频耐电压,电压波形尽可能具有正弦波形。对于额定电压为 6 kV 及以上的电动机,如果工频电源设备不能满足要求,经过协商,可以用直流试验来替代。
- c) 应在被试绕组和电动机机壳之间施加试验电压,而铁心和非被试绕组则与机壳连接。此试验仅对装配完成的新电动机进行。试验时,电动机的所有部件均应安装就位,如同正常工况。试验应在制造厂内或现场安装完毕后进行。
- d) 对额定电压在 1 kV 以上的电动机,若每相的两端均单独引出时,则应每相逐一进行试验。
- e) 试验变压器应有足够的容量,按下列方法选择:
 - 对低压电动机,每 1 kV 试验电压,试验变压器的容量应不小于 1 kV·A;
 - 对高压电动机,当其电容量较大时,试验变压器的容量应大于按公式(248)求得的计算容量 S_T (kV·A):

$$S_T = 2\pi f C U_i U_{TN} \times 10^{-3} \quad \dots\dots\dots (248)$$

式中：

f ——电源频率,单位为赫兹(Hz);

C ——被试电动机的电容量,单位为法拉(F);

U_t ——试验电压,单位为伏特(V);

U_{TN} ——试验变压器高压侧的额定电压,单位为伏特(V)。

对小功率电动机,每1 kV 试验电压,试验变压器的容量应不小于 $0.5 \text{ kV} \cdot \text{A}$ 。

- f) 额定电压在 3 kV 及以上的电动机进行耐电压试验时,宜在试验变压器接线柱与被试绕组之间并联接入放电铜球。
- g) 试验电压应在试验变压器的高压侧进行测量。
- h) 试验前,应采取切实安全的防护措施,试验中发现异常情况,应立即切断试验电源。
- i) 试验后,应先将绕组对地放电,然后方可拆下连接导线。

13.5.2 试验电压和时间

试验应从不超过试验电压全值的一半开始,然后均匀地或以每步不超过全值 5% 逐步增至全值,电压从半值增至全值的时间应不少于 10 s。全值试验电压值应符合 GB/T 755—2019 的表 17 中的规定,并维持 1 min。在试验过程中,被试电动机应无故障发生。

当对批量生产的 200 kW(或 $\text{kV} \cdot \text{A}$) 及以下、额定电压 $U_N \leq 1 \text{ kV}$ 的电动机进行常规试验时,1 min 试验可用 1 s 试验来代替,但试验电压值应为 GB/T 755—2019 的表 17 规定的 120%。

验收时不应再对绕组再重复进行全值电压的耐电压试验。

13.6 转子开路电压的测定

绕线转子电动机及交流换向器电动机需进行转子开路电压测定。

测量时,转子应静止不转动,转子绕组开路,定子绕组上施以额定频率的额定电压,在转子集电环间分别测量各线间的电压值。如发现有电压不平衡现象,通常是在几个不同的转子位置读取转子电压,取算术平均值作为转子电压。

对转子电压较高的电动机,施于定子绕组上的电压可适当降低,使转子电压能不使用电压互感器直接测量为宜。

定子电压与转子开路电压之比,称为绕线转子电动机的电压比。

13.7 超速试验

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。

如被试电动机的标准中无规定时,超速试验允许在冷态下进行。对大型电动机,允许对转子单独进行超速试验。

试验时,将电动机的转速提高到 1.2 倍最高额定转速或规定的最高转速,历时 2 min。

超速的方法有下列两种：

- a) 提高被试电动机的电源频率；
- b) 用原动机直接驱动或通过变速装置驱动被试电动机。

超速试验时,应采取安全防护措施,尽可能远距离测量转速。

13.8 噪声的测定

噪声的测定按 GB/T 10069.1—2006 规定的方法进行。

13.9 振动的测定

振动的测定按 GB/T 10068—2020 规定的方法进行。

13.10 轴电压的测定

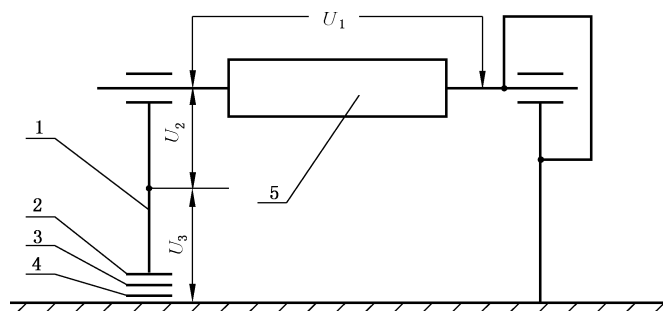
轴电压测量示意图见图 13。

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,确保电动机绝缘良好。

在电动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,确保电动机轴承绝缘良好。

第一次测定时,被试电动机应在额定电压、额定频率下空载运行,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,被试电动机在额定电流、额定频率下额定负载运行,测量轴承电压 U_2 。



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 13 轴电压测量示意图

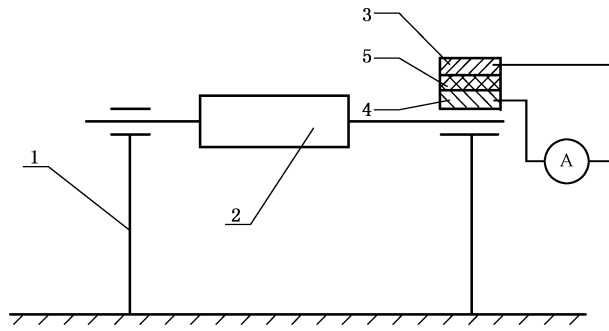
13.11 轴承电流的测定

对使用滚动轴承的电动机,轴承电流按图 14 给出的示意图进行测量。

在电动机非轴伸端的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,确保电动机轴承绝缘良好。

将电流表串联到与轴承绝缘层两面接触的的金属件上,分别在额定电压、额定频率下空载运行,测量电流值,即为轴承电流。

对使用滑动轴承和滚动轴承的电动机,如不能按上述方法测量,可采用轴上放置电流互感器的方法测量轴电流。



标引序号说明：

- 1 —— 轴承座；
- 2 —— 转子；
- 3、4 —— 与轴承绝缘体两面接触的金属部件；
- 5 —— 轴承绝缘体。

图 14 轴承电流测量示意图

A.2 仪表刻度误差的修正

根据电流表、电压表、功率表指示的数值 I_A 、 U_V 、 P_w 按公式(A.4)、公式(A.5)和公式(A.6)进行刻度误差的修正。

$$I' = I_A + \Delta I \quad \dots\dots\dots (A.4)$$

$$U' = U_V + \Delta U \quad \dots\dots\dots (A.5)$$

$$P'_w = P_w + \Delta P_w \quad \dots\dots\dots (A.6)$$

式中：

ΔI 、 ΔU 、 ΔP_w ——分别为电流表、电压表和功率表的读数修正值，可从仪表的校验报告中获得。

A.3 互感器变比误差的修正

A.3.1 通则

电流互感器和电压互感器的变比误差，可从互感器校验报告中获得。当互感器二次侧的实际负载与校验中的负载不同时，其变比误差可以由互感器不同负载时的变比特性曲线来估算。

A.3.2 互感器的实际变比

电流互感器的实际变比，如公式(A.7)表示：

$$K_I = K_{In}(1 - \gamma_I) \quad \dots\dots\dots (A.7)$$

电压互感器的实际变比，如公式(A.8)表示：

$$K_U = K_{Un}(1 - \gamma_U) \quad \dots\dots\dots (A.8)$$

式中：

K_{In} 、 K_{Un} ——分别为电流互感器的标称变流比和电压互感器的标称变压比。

γ_I 、 γ_U ——分别为电流互感器的变流比和电压互感器的变压比误差。

A.3.3 对测量值的修正

电流互感器一次侧的实际电流，按公式(A.9)计算：

$$I = K_I I' \quad \dots\dots\dots (A.9)$$

电压互感器一次侧的实际电压，按公式(A.10)计算：

$$U = K_U U' \quad \dots\dots\dots (A.10)$$

修正后的功率，按公式(A.11)计算：

$$P = K_U K_I P'_w \quad \dots\dots\dots (A.11)$$

A.3.4 互感器相角误差的修正

A.3.4.1 概述



功率测量中的相角误差包括：

- a) 功率表电压线圈回路中的相角误差；
- b) 电流互感器的相角误差；
- c) 电压互感器的相角误差。

A.3.4.2 功率表电压线圈回路中的相角误差

相角误差 α ，按公式(A.12)计算：

$$\alpha = \arctan \frac{X_w}{R_w} \quad \dots\dots\dots (A.12)$$

式中：

R_w ——功率表电压线圈回路的总电阻(包括外接附加电阻),单位为欧姆(Ω);

X_w ——功率表电压线圈的感抗,单位为欧姆(Ω)。按公式(A.13)计算：

$$X_w = 2\pi fL \quad \dots\dots\dots (A.13)$$

式中：

L ——功率表电压线圈的电感,单位为亨利(H)。可从功率表的刻度盘上获得。

相角误差 α 符号的决定:当 X_w 为容抗时,取“+”号;当 X_w 为感抗时,取“-”号。对无补偿的功率表,其电压线圈为感抗。

A.3.4.3 电流互感器的相角误差

电流互感器的相角误差 β_i 可以从互感器校验报告中获得。当互感器二次侧的实际负载与校验中的负载不同时,其相角误差 β_i 可以由互感器不同负载时的相角特性曲线来估算。

相角误差 β_i 符号的决定:当二次侧电流超前一次侧电流时,取“+”号;滞后时,取“-”号。对无补偿的电流互感器,二次侧电流超前一次侧电流。

A.3.4.4 电压互感器的相角误差

电压互感器相角误差 β_U 的确定方法与电流互感器相同。

相角误差 β_U 符号的决定:当二次侧电压超前一次侧电压时,取“+”号;滞后时,取“-”号,对无补偿的电压互感器,二次侧电压滞后一次侧电压。

A.3.4.5 功率测量值的修正

修正前的表观功率 S 及功率因数 $\cos\varphi'$ 按公式(A.14)、公式(A.15)和公式(A.16)计算：

$$S = UI \quad \dots\dots\dots (A.14)$$

$$\cos\varphi' = \frac{P}{S} \quad \dots\dots\dots (A.15)$$

$$\varphi' = \arccos\left(\frac{P}{S}\right) \quad \dots\dots\dots (A.16)$$

实际的功率因数 $\cos\varphi$ 按公式(A.17)计算：

$$\cos\varphi = \cos(\varphi' + \beta_i + \beta_U) \quad \dots\dots\dots (A.17)$$

相角修正系数 K_φ 按公式(A.18)计算：

$$K_\varphi = \frac{\cos\varphi}{\cos\varphi'} \quad \dots\dots\dots (A.18)$$

经相角误差修正后,实际的功率值 P_C 按公式(A.19)计算：

$$P_C = P K_\varphi \quad \dots\dots\dots (A.19)$$

附录 B

(资料性)

确定损耗和效率的试验方法对照表

本文件与其他文献确定损耗和效率的试验方法对照见表 B.1。

表 B.1 确定损耗和效率的试验方法对照表

| 本文件 | 其他文件 |
|-----------------------------|--|
| A 法,输入输出法 | IEC 60034-2-1:2014 的 6.1.2:输入输出法 IEEE Std 112:2017 的 6.3:A 法 |
| B 法,测量输入和输出功率的损耗分析法 | IEC 60034-2-1:2014 的 6.1.3:各项损耗求和法,剩余损耗分析法 IEEE Std 112:2017 的 6.4:B 法 |
| C 法,成对电机双电源对拖回馈试验损耗分析法 | IEC 60034-2-1:2014 的 6.2.2:双电源对拖法 IEEE Std 112:2017 的 6.6:C 法 |
| E 法,测量输入功率的损耗分析法,反转法求杂散损耗 | IEC 60034-2-1:2014 的 6.2.4:各项损耗求和法,反转法求杂散损耗 IEEE Std 112:2017 的 6.7:E 法 |
| E1 法,测量输入功率的损耗分析法,推荐值法求杂散损耗 | IEEE Std 112:2017 的 6.7:E1 法 |
| F 法,等值电路法,反转法求杂散损耗 | IEEE Std 112:2017 的 6.8:F 法 |
| F1 法,等值电路法,推荐值法求杂散损耗 | IEC 60034-2-1:2014 的 6.2.6:等值电路法 IEEE Std 112:2017 的 6.8:F1 法 |
| G 法,降低电压负载法,反转法求杂散损耗 | — |
| G1 法,降低电压负载法,推荐值法求杂散损耗 | IEC 60034-2-1:2014 的 6.1.4:降低负载各项损耗求和法,推荐值法求杂散损耗 |
| H 法,圆图法 | — |



附录 C
(资料性)
线性回归分析

C.1 概述

线性回归分析的目的是找出两组变量之间的数学关系,以便用一组变量求出另一组变量。线性回归分析认为如果这两组变量呈线性关系,即用两组变量的一对值(如: T^2, P_{Lr})画图,则这些点几乎为一直线。这些点与直线的吻合程度由相关系数 γ 表示。

C.2 方法

C.2.1 数据准备

线性回归分析所需数据,见表 C.1。

表 C.1 线性回归数据表

| Line | T^2 | P_{Lr} | $(T^2)^2$ | $(P_{Lr})^2$ | $P_{Lr} \times T^2$ |
|------|----------|----------|-----------|--------------|---------------------|
| 1 | | | | | |
| 2 | | | | | |
| 3 | | | | | |
| 4 | | | | | |
| 5 | | | | | |
| 6 | | | | | |
| 求和 | Σ | Σ | Σ | Σ | Σ |

注 1: T 根据 8.4 确定输出轴转矩,单位为牛顿米(N·m)。
注 2: P_{Lr} 根据 11.6.2.3 确定的剩余损耗,单位为瓦特(W)。

C.2.2 回归方程

剩余杂散损耗数据应通过线性回归分析回归分析法进行修匀(见图 C.1),线性回归方程按公式(C.1)。

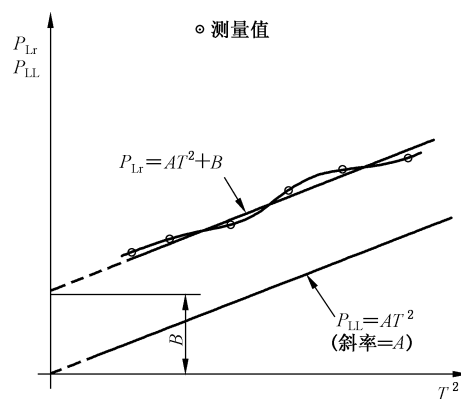


图 C.1 剩余杂散损耗数据的修匀

$$P_{Lr} = A \times T^2 + B \quad \dots\dots\dots (C.1)$$

C.2.3 斜率 *A* 的确定

斜率 *A* 按公式(C.2)计算：

$$A = \frac{i \sum (P_{Lr} T^2) - \sum P_{Lr} \sum T^2}{i \sum (T^2)^2 - (\sum T^2)^2} \quad \dots\dots\dots (C.2)$$

式中：

i——负载试验点的个数。

C.2.4 截距 *B* 的确定

截距 *B* 按公式(C.3)计算：

$$B = \frac{\sum P_{Lr}}{i} - A \frac{\sum T^2}{i} \quad \dots\dots\dots (C.3)$$

C.2.5 相关系数 γ 的确定

相关系数 γ 按公式(C.4)计算：

$$\gamma = \frac{i \sum (P_{Lr} T^2) - \sum P_{Lr} \sum T^2}{\sqrt{[i \sum (T^2)^2 - (\sum T^2)^2] \times [i \sum P_{Lr}^2 - (\sum P_{Lr})^2]}} \quad \dots\dots\dots (C.4)$$



参 考 文 献

- [1] GB/T 2900.25—2008 电工术语 旋转电机
 - [2] IEEE Std 112:2017 Test Procedure for Polyphase Induction Motors and Generators
 - [3] IEC 60034-2-1:2014 Rotation electrical machines—Part 2-1:Standard methods for determining losses and efficiency from tests(excluding machines for traction vehicles)
-

**GB/T 1032—2023《三相异步电动机试验方法》
国家标准第 1 号修改单**

本修改单经国家市场监督管理总局(国家标准化管理委员会)于 2025 年 06 月 30 日批准,自 2025 年 06 月 30 日起实施。

一、表 7 中更改为:

表 7 B 法计算格式



| 序号 | 项目 | 数据来源或计算 |
|-----|---|--|
| ... | ... | ... |
| 8 | 频率 f/Hz | 见 12.3.1.3 |
| ... | ... | ... |
| 28 | 负载杂散损耗 P_{LL}/W | $(28) = (26) \times (22)^2$ |
| ... | ... | ... |
| 33 | 规定温度(θ_s)下转子绕组 I^2R 损耗 $P_{r,\theta}/\text{W}$ | $(33) = [(15) - (17) - (29)] \times (30) / (9)$ |
| 34 | 总损耗 P_T/W | $(34) = (16) + (17) + (28) + (29) + (33)$ |
| 35 | 输出功率 P_2/W | $(35) = (15) - (34)$ |
| 36 | 效率 η | $(36) = 100\% \times (35) / (15)$ |
| 37 | 功率因数 $\cos\varphi$ | $(37) = (15) / [\sqrt{3} \times (13) \times (14)]$ |

