

团 体 标 准

T/CMES 07008—2024

永磁同步电动机通用技术条件

General technical conditions for permanent magnet
synchronous motor

2024-04-03 发布

2024-05-06 实施

中国机械工程学会 发布

中国机械工程学会（英文简称 CMES）是具备开展国内、国际标准化活动资质的全国性社会团体。制定中国机械工程学会团体标准，以满足企业需要和市场需求，推动机械工业创新发展，是中国机械工程学会团体标准的工作内容之一。中国境内的团体和个人，均可提出制、修订中国机械工程学会团体标准的建议并参与有关工作。

中国机械工程学会团体标准按《中国机械工程学会标准化管理办法》进行制定和管理。

中国机械工程学会团体标准草案经向社会公开征求意见，并得到参加审定会议的 3/4 以上的专家、成员的投票赞同，方可作为中国机械工程学会团体标准予以发布。

在本标准实施过程中，如发现需要修改或补充之处，请将意见和有关资料寄给中国机械工程学会，以便修订时参考。

本标准版权为中国机械工程学会所有。除了用于国家法律或事先得到中国机械工程学会正式许可外，不许以任何形式复制、传播该标准或用于其他商业目的。

中国机械工程学会地址：北京市海淀区首体南路 9 号主语国际 4 座 11 层

邮政编码：100048 电话：010-68799027 传真：010-68799050

网址：www.cmes.org 联系人：袁俊瑞 电子信箱：yuanjr@cmes.org

目 次

前 言 V

1 范围 1

2 规范性引用文件 1

3 术语和定义 1

4 技术要求 2

 4.1 一般要求 2

 4.2 转速 4

 4.3 温升 4

 4.4 噪声 4

 4.5 零位角度 4

 4.6 反电势 5

 4.7 驱动特性 5

 4.8 堵转性能 6

 4.9 驱动电机空载损耗 6

 4.10 齿槽转矩 6

 4.11 转矩脉动 6

 4.12 最高工作转速 6

 4.13 动态响应 6

 4.14 馈电特性 6

 4.15 短路性能 6

 4.16 抗退磁性能 7

 4.17 安全性 7

 4.18 环境适应性 7

 4.19 电磁兼容性 9

 4.20 可靠性 9

 4.21 扭矩疲劳性能 9

 4.22 耐久性 9

5 试验方法 9

5.1 一般性测试 9

5.2 转速 13

5.3 温升 13

5.4 噪声 13

5.5 零位角度 13

5.6 反电势 14

5.7 驱动特性 15

5.8 堵转性能 15

5.9 驱动电机空载损耗 15

5.10 齿槽转矩试验 16

5.11 转矩脉动 16

5.12 最高工作转速 16

5.13 动态响应 17

5.14 馈电试验 17

5.15 短路试验 17

5.16 退磁试验 17

5.17 安全性 18

5.18 环境适应性 18

5.19 电磁兼容性 19

5.20 可靠性 19

5.21 扭转疲劳性能 19

5.22 耐久性 22

6 检验规则 22

6.1 检验分类 22

6.2 出厂检验 22

6.3 型式检验 22

7 标志 23

7.1 系列号 23

7.2 电机铭牌 23

7.3 引出线和接线端 23

7.4 高压警示 23

附 录 A （资料性附录） 24

A.1 检验应分为出厂检验和型式检验，并应符合表 A.1 的规定。 24

A.2 驱动电机原理如图 A.1 所示。26

图 1 旋转变压器动态零位 5

图 2 绕组连接形式 11

图 3 旋变零位 VW 测试 14

图 4 相序波形示意图 15

图 5 堵转试验定位与测试 16

图 6 直流退磁试验 18

图 7 疲劳扭转定位接线图 20

图 8 疲劳扭转定位接线图 20

图 9 正向扭转接线图 21

图 10 反向扭转接线图 21

图 11 扭转疲劳负荷图 22

表 A.1 检验分类 24

图 A.1 驱动电机原理 26

表 1 额定负载性能 5

表 2 峰值负载性能 5

表 3 堵转性能 6

表 4 短路试验性能 7

表 5 高温工作温度限值 8

表 6 扫频振动试验严酷度等级 9

表 7 测试仪器精度等级 10

前 言

本文件依据 GB/T 1.1-2020 给出的规则起草。

考虑到本文件中的某些条款可能涉及专利，中国机械工程学会不负责对其任何专利的鉴别。

本文件起草单位：湖北文理学院，东风电驱动系统有限公司，华中科技大学，东南大学，襄阳中车电机技术有限公司

本文件起草人：吴华伟、彭建平、殷国栋、陈关关、李文龙、蔡甲春、李伟业、杨俊保、孟振、黄运伟、李智、耿向阳、魏长银、胡晓曦、王绍文、陈运星

永磁同步电动机通用技术条件

1 范围

本文件规定了电动汽车永磁同步电动机的一般要求、检验方法、检验规则与标志。

本文件适用于海拔高度低于 3000m、1kV 及以下低压电路、初级冷却介质为空气的电动汽车用永磁同步电动机。

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 755 旋转电机 定额和性能

GB 1971 旋转电机 线端标志与旋转方向

GB/T 2900.25 电工术语 旋转电机

GB/T 2900.33 电工术语 电力电子技术

GB 14711 中小型旋转电机通用安全要求

GB/T 18488.1 电动汽车用驱动电机系统 第 1 部分：技术条件

GB/T 18488.2 电动汽车用驱动电机系统 第 2 部分：试验方法

GB/T 22715 旋转交流电机成型绕组耐电压冲击水平

GB/T 22720.1 电压型变频器供电的旋转电机无局部放电（I型）电气绝缘结构的鉴别和质量控制试验

GB/T 28046.3 道路车辆 电气及电子设备的环境条件和试验 第 3 部分：机械负荷

GB/T 29307 电动汽车用驱动电机系统可靠性试验方法

QC/T 1069 电动汽车用永磁同步驱动电机系统

3 术语和定义

GB/T 2900.25、GB/T 2900.33、GB/T 18488.1、GB/T 19596 和 QC/T1069 界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

3.1

永磁同步驱动电机系统 permanent magnet synchronous drive motor system

由永磁同步驱动电机（以下简称电机）、电机控制器（以下简称控制器）、连接电缆和驱动电机系统工作所必需的辅助装置所构成的单元（以下简称驱动电机系统）。

3.2

最高工作电压 maximum operating voltage

直流母线电压的最高值

3.3

空载反电势 no-load back electromotive force

驱动电机在规定的转速和永磁体温度条件下转动，三相绕组开路时任意两相间的线电动势的均方根值，（以下简称反电势）。

3.4

空载反电势的典型值 typical value of No-load back electromotive force

至少4台驱动电机（其中两台已做过型式检验）在规定的转速和永磁体温度条件下空载反电势均方根值的平均值。

3.5

稳态短路电流 steady state short circuit current

驱动电机所有绕组引出线对称短接，以规定转速被拖动时绕组相电流的均方根值。

3.6

稳态短路电流的典型值 typical value of steady-state short-circuit current

至少4台驱动电机（其中两台已做过型式检验）在规定的转速和永磁体温度下的稳态短路电流的平均值。

3.7

永磁体退磁 permanent magnet annealing

永磁体产生不可逆退磁的现象。

4 技术要求

4.1 一般要求

电机应在下列测试条件下进行驱动特性测试：

- a) 温度：18℃~28℃；
- b) 相对湿度：45%~75%；
- c) 气压：86kPa~106kPa；
- d) 冷却条件：产品技术文件规定的冷却方式。

4.1.1 外观

电机表面不应有锈蚀、碰伤、划痕，涂覆层不应有剥落，紧固件连接应牢固，引出线或接线端应完整，颜色和标志应正确，铭牌应清晰耐久。

4.1.2 液冷系统冷却回路密封性能

液冷电机及控制器，冷却液道应承受产品技术文件规定的或不低于200kPa的压力，无渗漏。

4.1.3 电机定子绕组冷态直流电阻

电机定子绕组冷态直流电阻值应符合设计要求。

4.1.4 绝缘电阻

电机定子绕组冷态直流电阻值应符合设计要求。

4.1.4.1 电机定子绕组对机壳的绝缘电阻

电机定子绕组对机壳的绝缘电阻应满足以下要求：

- a) 电机定子绕组对机壳的冷态绝缘电阻值参考 GB/T 18488.1-2015。
- b) 电机定子绕组对机壳的热态绝缘电阻值不应低于式(1)计算的电阻值 ($M\Omega$)：

$$R = \frac{U_{dc_max}}{1000 + \frac{P}{1000}} \quad (1)$$

式中：

R ——电机定子绕组对机壳的热态绝缘电阻，单位为兆欧 ($M\Omega$)；

U_{dc_max} ——最高工作电压，单位为伏 (V)；

P ——电机的额定功率，单位为千瓦 (kW)；

- c) 按式 (1) 计算的绝缘电阻低于 $0.38M\Omega$ 时，应按 $0.38M\Omega$ 考核。

4.1.4.2 电机定子绕组对温度传感器的绝缘电阻

电机定子绕组对温度传感器的绝缘电阻应满足以下要求：

- a) 电机温度传感器应固定于定子绕组中，电机绕组对温度传感器的冷态绝缘电阻值应大于 $20M\Omega$ ；
- b) 电机定子绕组对温度传感器的热态绝缘电阻值不应低于式 (1) 的计算值；
- c) 按式 (1) 计算的绝缘电阻低于 $0.38 M\Omega$ ，应按 $0.38 M\Omega$ 考核。

4.1.5 耐电压

4.1.5.1 电机绕组的匝间冲击耐电压

电机绕组的匝间冲击耐电压应满足以下要求：

- a) 电机绕组应按规定冲击电压峰值对匝间冲击耐压试验，波前时间应为 $0.2\mu s$ ；
- b) 测得的绕组放电波形应为正常衰减振荡波形，同标准波形比较应无显著差异，两波形间的波形差面积应符合产品工艺文件的规定。
- c) 匝间冲击电压峰值应按式 (2) 计算：

$$UT = 3.4U_{dc_max} + 1700 \quad (2)$$

式中：

U_{dc_max} ——最高工作电压，单位为伏 (V)；

UT ——电机匝间冲击电压峰值，单位为伏 (V)；

4.1.5.2 电机绕组工频耐电压

电机绕组工频耐电压应满足以下要求：

- a) 电机绕组应按规定冲击电压峰值对匝间冲击耐压试验，波前时间应为 $0.2\mu s$ ；a) 电机绕组应承受 $50Hz$ 的正弦波工频耐电压试验，无击穿现象；
- b) 耐压限值有效值应按式 (3) 规定，漏电流限值应符合产品图纸规定；

$$UG = 2U_{dc_max} + 1000 \quad (3)$$

式中：

UG ——电机工频耐电压有效值，单位为伏（V）；

c) 按式（3）计算的工频耐压有效值低于 1500V 时，应按 1500V 考核。

4.1.5.3 电机绕组对温度传感器的工频耐电压

电机温度传感器应固定于定子绕组中，电机绕组对温度传感器应承受 1500V 的耐电压试验，应无击穿现象，漏电流不应大于 3mA。

4.2 转速

电机在热态下应承受 1.2 倍最高工作转速试验，持续时间为 2min，并应保证机械不发生有害变形。

4.3 温升

电机匹配控制器工作，额定工况和最高转速额定功率工况下运行至热平衡，电机绕组温升均不应高于 80K 或符合产品主机要求。

额定工况运行至热平衡后继续进行峰值扭矩试验，短期温升不应大于 90K 或符合主机要求。

4.4 噪声

电机同控制器匹配工作，在额定转速下空载运行，噪声不应大于 70dB(A)，或符合质量文件的规定。

4.5 零位角度

4.5.1 相序

电机按驱动方向旋转时，三相绕组空载反电势相序顺序方向顺序应为 U、V、W。

4.5.2 零位角度

零位角度应满足以下要求：

- a) 零位角度应符合产品设计要求。
- b) 一般静态测试时，按 U、V、W 三相通电法测试，标准解码器读出电角度应为 $0^\circ \pm 1^\circ$ ；U-V 两相通电法测试，解码器读出电角度应为 $90^\circ \pm 1^\circ$ 。
- c) 动态测试时，一般相电势 E_u 同旋转变压器正弦信号包络线同相位或 E_{vw} 同旋转变压器余弦信号包络线同相位。图 1 示零位角为 $0^\circ \pm 1^\circ$ 。

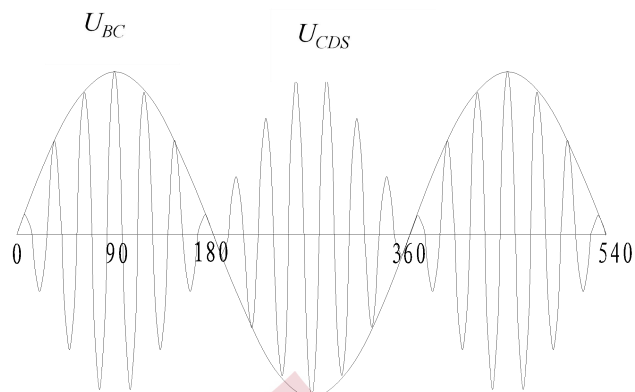


图 1 旋转变压器动态零位

4.6 反电势

额定转速时空载反电势总谐波畸变率（THD）不应大于 5%。

驱动电机在最高工作转速时的反电势有效值不应大于 1.26 倍电池标称电压或符合产品技术文件的规定，额定转速时反电势与典型值偏差不应超过±5%。

4.7 驱动特性

4.7.1 工作电压范围

电机系统工作电压范围应符合 GB 755 和产品技术文件的规定。

4.7.2 空载性能

电机匹配控制器应工作电压范围正常运行，全转速范围内应运转平稳、无异响、啸叫等异常现象。

4.7.3 额定工况性能

电机额定工况运行应正常，额定负载性能应符合的规定，见表 1。

表 1 额定负载性能

母线电压 DC（V）	额定转 矩(N.m)	额定转速 （r/min）	额定功率（kw）	额定电流(A)
VDC±0.2%	TN±0.5	nN±10	PN	≤IN

4.7.4 峰值工况

电机在规定的峰值功率工况条件下短时运行，应无任何异常现象。峰值负载性能应符合规定，见表 2。

表 2 峰值负载性能

转速 （r/min）	母线电压 （V）	转矩 （N.m）	功率（kw）	母线电流(A)
转折速度1	VDC±0.2%	峰值扭矩1	-	≤Imax

峰值扭矩 转速2		峰值扭矩2	-	$\leq I_{max}$
最高转速		-	$\geq 0.9 \times \text{峰值功率}$	-

4.7.5 驱动效率

驱动电机在驱动特性工况下，效率应符合产品设计要求。

4.7.5.1 最高效率

在额定电压下，电机系统最高效率不应低于 93%或符合产品技术文件规定。

4.7.5.2 高效工作区

在额定电压下，效率不低于 85%的电机高效工作区占总工作区的百分比不应低于 90%或符合产品技术文件规定。

4.8 堵转性能

堵转性能应符合表 3 的规定。

表 3 堵转性能

母线电压 D (V)	堵转转矩 (N.m)	堵转电流 (ADC)
UN	Mmax	$\leq I_{max}$

4.9 驱动电机空载损耗

驱动电机空载损耗不应大于额定功率 0.5%或满足产品设计要求。

4.10 齿槽转矩

齿槽转矩不应大于 GB 755 和产品技术文件的规定，不宜大于额定转矩 0.2%。

4.11 转矩脉动

转矩脉动不应大于 GB 755 和产品技术文件的规定，不应大于额定转矩的 $\pm 3\%$ 。

4.12 最高工作转速

在规定电压下，电机匹配控制器带载输出达到转速应符合产品设计要求。

4.13 动态响应

电机在堵转状态下运行，匹配控制器峰值扭矩相应时间不应大于 80ms 或符合产品技术文件的规定。

4.14 馈电特性

电机系统应具有发电功能，发电电压范围、发电电流和馈电效率应符合产品技术文件规定。

4.15 短路性能

短路试验性能应符合表 4 或产品设计要求。

表 4 短路试验性能

转速 (r/min)	短路电流 (Arms)	短路电流容差(%)
nN	$i_d \geq 1.5i_N$	≤ 5.0

4.16 抗退磁性能

抗退磁性能应满足以下要求：

- a) 电机经 155℃高温试验后，热态反电势下降不应低于 12.5%，冷态应自动恢复，冷态空载反电势不应低于 99.0%。电机经短路试验后，冷态空载反电势不应低于 99.5%。电机经强制反向电流退磁试验后，冷态反电势下降不应低于 1.0%。
- b) 电机经高温、短路、反向退磁后试验后，综合空载反电势不应低于 98.5%。
- c) 完成老化试验后允许适当老化退磁，可靠性试验后额定转速下反电势下降不应高于 1.0%，耐久性试验后额定转速下反电势下降不应高于 2.0%。

4.17 安全性

4.17.1 安全接地检查

人体可能触及的电机可导电部分与外壳接地点处的电阻不应大于 0.1Ω，接地点应有明显的接地标志。

4.18 环境适应性

4.18.1 低温

4.18.1.1 低温贮存

电机应承受-40℃、持续时间 72 小时的低温贮存试验。低温贮存 72 小时的期间，电机为非通电状态。低温贮存持续 72 小时后，箱内复测绝缘电阻应符合 4.1.4.1 的规定。恢复常态后，电机匹配控制器应在额定电压、额定转速、额定功率下正常运行。

4.18.1.2 低温工作

电机应承受-40℃的低温工作试验。电机在-40℃的低温下，应正常起动，并应在额定电压、额定转速、额定功率下正常工作。试验后，箱内复测绝缘电阻应符合 4.1.4.1 的规定。

4.18.2 高温

4.18.2.1 高温贮存

电机应承受技术条件规定的、持续 72 小时的高温贮存试验。高温贮存 72 小时期间，电机为非通电状态。电机轴承内的油脂不允许有外溢。高温贮存持续 72 小时后，箱内复测绝缘电阻应符合 4.1.4.1 的规定。恢复常态后，电机匹配控制器应在额定电压、额定转速、额定功率下正常运行。

4.18.2.2 高温工作

电机应承受表 5 或用户与制造商协商确定的高温工作试验，试验温度与工作时间参考 GB/T 18488.2-2015。电机应以额定电压、额定转速、额定功率正常运行，高温工作持续时间应符合产品技术文件。高温工作后，箱内复测绝缘电阻应符合 4.1.4.1 的规定。

表 5 高温工作温度限值

产品类别	上限工作温度 (°C)
混合动力汽车 (HEV) 产品	120
纯电动汽车 (EV) 产品	85

4.18.3 高低温冲击

电机应承受-40℃和 85℃的温度冲击 10 个循环试验，恢复常态后，电机匹配控制器应在额定电压、额定转速、额定功率下正常工作。

4.18.4 湿热性能

电机应承受 40±2℃，相对湿度为 90%~95%，48 小时的恒定湿热试验，电机应无明显的外表质量损坏及影响正常工作的锈蚀现象。

在恒定湿热试验的最后 2 小时内，于湿热相同条件下测量电机的绝缘电阻，应符合 4.1.4.1、4.1.4.2 的规定，测试电机中动力线与地或外壳之间的绝缘电阻，应符合 4.1.4.2 的规定。

试验完成后，于试验箱内，按复试电压对电机进行耐电压试验，历时 1min，应无击穿；之后取出电机，恢复常态后，电机匹配控制器应在额定电压、额定转速、额定功率下正常运行。

4.18.5 防护性能

防护性能应满足以下要求：

- 整机防护在实际安装状态下应符合 IP67 或产品设计要求。
- 电机在整车或其他总成上安装时，安装三相电缆等打开电机盖板时，电机应具有防止小螺钉、螺帽掉入电机内部后分解电机方可取出的能力，电机应具备 IP2X 防护等级。

4.18.6 盐雾

电机及控制器的抗盐雾能力，应符合 GB/T 2423.17 的规定。试验周期应为 96 小时或符合技术文件的规定。试验后，电机及控制器恢复 1 小时~2 小时后，应正常工作。

4.18.7 防凝露能力

电机应具有呼吸阀等呼吸及防凝露设计。电机运行至热平衡后再停止工作并置于低温环境中，电机内部在端盖、接线盒盖板表面可产生小水珠等凝露现象，但凝露不应影响电机正常启动与运行。

4.18.8 耐振动

耐振动应满足以下要求：

- 电机试验宜在不工作及正常安装状态条件下进行，在工作状态下试验时，应在产品技术文件中规定；
- 振动试验点宜为试验夹具与试验台结合处，当检测点有要求时应在产品标准中规定；
- 电机经振动试验后，零部件应无损坏，紧固件应无松脱现象；应在额定电压、额定转速、额定功率下正常工作。

4.18.8.1 扫频振动

电机及控制器应经受 X、Y、Z 三个方向的扫频振动试验，扫频振动试验严酷度等级应符合表 6 的规定。

表 6 扫频振动试验严酷度等级

产品类别	频率 Hz	振幅 mm	加速度 m/s ²	扫频速率 oct/min	每一方向试验时间 小时
HEV 电机	10~50	2.5		1	8
	50~200	0.16			
	200~500		250		
BEV 电机	10~25	3.96		1	8
	25~500		100		

注 1：表中振幅和加速度适用于 Z 方向，对于 X 和 Y 方向，振幅和加速度可除以 2。
注 2：振动检验时的 Z 方向规定为：安装在发动机上的产品为与发动机缸孔轴线方向平行的方向；安装在其它部位的产品为与汽车垂直方向平行的方向。

4.18.8.2 随机振动

电机应经受 X、Y、Z 三个方向的随机振动试验，电机随机振动的严酷度限值及试验持续时间应符合 GB/T 28046.3 的规定。

4.19 电磁兼容性

4.19.1 电磁辐射骚扰

电机系统在车辆中运行产生的辐射骚扰应符合 GB/T 18387 和 GB 14023 的规定。

4.19.2 电磁辐射抗扰性

电机系统电磁辐射抗扰性应符合产品技术文件规定，限值不应低于 GB/T 17619 的规定。

4.20 可靠性

可靠性应满足以下要求：

- a) 电机可靠性试验在 1.1 倍额定转速、驱动状态峰值扭矩至发电状态额定回馈扭矩的交变负载不应低于 400 小时,最高工作转速额定功率输出状态下运行不应低于 2 小时，应进行 402 小时定时截尾试验。
- b) 定时截尾试验后电机冷态绝缘电阻不应低于 20MΩ，驱动特性峰值扭矩下降不应低于 3%。
- c) 电机平均首次故障时间、平均故障间隔时间应符合 GB/T29037 的规定。

4.21 扭矩疲劳性能

在±1.0 倍额定扭矩的交变试验条件下，电机应经 50 万次交变扭矩而不失效，或±1.5 倍额定扭矩的 20 万次交变扭矩不应失效。

4.22 耐久性

电机对拖试验台架耐久性不应低于 2000 小时，驱动特性峰值扭矩下降不应低于 5%。

5 试验方法

5.1 一般性测试

5.1.1 总则

除下列规定外，其他试验方法应按 GB/T18488.2 执行，测试仪器精度等级应符合表 7 的规定。

表 7 测试仪器精度等级

项号	试验仪器	准确度或误差
1	电气测量仪器	0.5 级（兆欧表除外）
2	电流传感器	0.2 级
3	转速测量仪	$\pm 2r/min$
4	转矩测量仪	0.5 级
5	温度计	$\pm 1^{\circ}C$
6	微欧计	0.2 级

5.1.2 外观

电机开路水平放置，目测检查电机外观和装配质量；手动转动转子，检查转动灵活性和异响；力矩扳手检查紧固件拧紧力矩；用 500VDC 兆欧表测量电机绕组对地绝缘电阻。

5.1.3 外形和安装尺寸

根据被测电机系统尺寸，选择和使用满足精度要求的游标卡尺、螺旋测微仪、米尺等量具测量。

5.1.4 质量

采用满足精度的衡器称重电机质量，衡器测量误差不应超过被试品标称质量的 $\pm 2\%$ 。

5.1.5 液冷回路密封性测试

液冷回路密封性测试应按照以下步骤：

- a) 试验前，不允许对被试电机表面涂覆防止渗漏的涂层，允许采用无密封作用的化学防腐处理。
- b) 试验宜使用空气、氮气或惰性气体等气体介质，也可用含防锈剂的水、车用电机冷却液等液体介质。试验在专用测试台上进行，试验介质温度宜为 $5^{\circ}C \sim 40^{\circ}C$ ，并和试验环境温度一致。
- c) 用于测量试验介质压力的测量仪表的精度不应低于 1.5 级，量程应为试验压力的 1.5~3 倍。
- d) 将冷却回路的一端堵住，但不应产生影响密封性能的变形，向回路中充入试验介质，然后，逐渐加压至 4.1.2 规定的试验压力，保压至少 15min，测量泄漏量，符合技术文件规定。
- e) 压力保持过程中，压力仪表显示值不应下降，期间不允许有可见的渗漏通过被试品壳壁和任何固定的连接处。
- f) 试验介质为液体时，试验前应将冷却回路腔内的空气排净。试验过程中不得有明显可见的液滴或表面潮湿现象出现。
- g) 试验有异议时，仲裁试验应采用沉水方式。分解电机单独对壳体或定子测试，对液道充气加压至规定压力并沉入水箱中，观察壳体内外及端面表面应无气泡冒出。

5.1.6 电机定子绕组冷态直流电阻

5.1.6.1 环境温度的测量

电机定子绕组冷态直流电阻宜在实际冷状态下测量。环境温度的测量应按照以下步骤进行：

- a) 将电机在温度均匀的空间中放置使电机内外和环境温度一致，记录温度数值。
- b) 符合下列条件之一时，可判断温度均匀：

用温度计或埋置检温计测量电机绕组、铁心和环境温度，所测温度与环境温度之差不应超过 2K，必要时，温度计应有与外界隔热的措施，且放置温度计时间不少于 15min。测量绕组温度时应根据电机尺寸，在不同部位测量绕组端部和绕组槽部的温度，有困难时，可测量铁心齿和铁心轭部表面温度，取平均值作为绕组的实际冷状态下的温度。

电机处于不工作状态且在环境温度稳定的空间中放置时间超过 12 小时。

5.1.6.2 绕组直流电阻的测定

绕组直流电阻的测定应按照步骤进行：

- a) 使用微欧计法测量绕组直流电阻，通过绕组的试验电流不应超过额定电流的 10%，通电时间不应超过 1min。
- b) 测量时，电机转子静止不动。绕组的各相各支路的始末端均引出时，应分别测量各相各支路的直流电阻。
- c) 各相绕组在电机内部连接时，应在每个出线端间测量电阻。对于三相电机，各相电阻值应按下式计算：

对星形接法的绕组，如图 2a)

$$R_U = R_{med} - R_{VW} \quad (4)$$

$$R_V = R_{med} - R_{WU} \quad (5)$$

$$R_W = R_{med} - R_{UV} \quad (6)$$

对三角形接法的绕组，如图 2b)

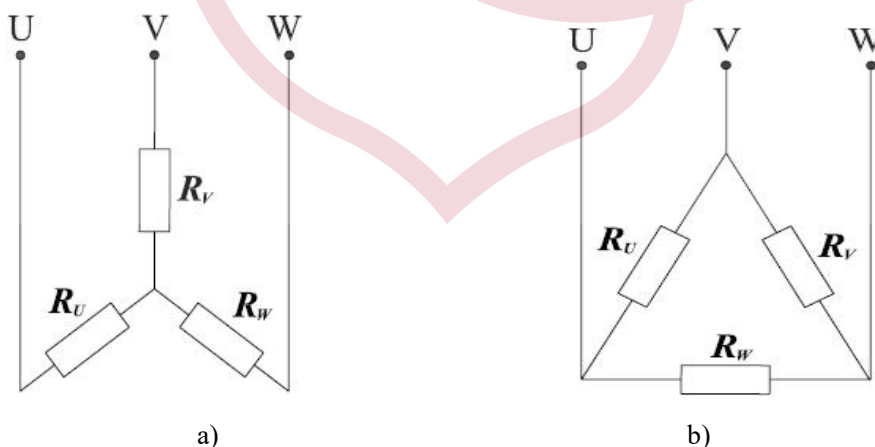


图2 绕组连接形式

$$R_U = \frac{R_{VW} \cdot R_{WU}}{R_{med} - R_{UV}} + R_{UV} - R_{med} \quad (7)$$

$$R_V = \frac{R_{WU} \cdot R_{UV}}{R_{med} - R_{VW}} + R_{VW} - R_{med} \quad (8)$$

$$R_W = \frac{R_{UV} \cdot R_{VW}}{R_{med} - R_{WU}} + R_{WU} - R_{med} \quad (9)$$

式中：

$$R_{med} = (R_{UV} + R_{VW} + R_{WU}) / 2 ;$$

R_{UV} 、 R_{VW} 、 R_{WU} ——分别为出线端 U 与 V、V 与 W 和 W 与 U 之间测得的电阻值 (mΩ)；

R_U 、 R_V 和 R_W ——分别为各相的相电阻 (mΩ)。

注：对于其他相数电机，另行推导公式计算。

5.1.7 绝缘电阻

5.1.7.1 定子绕组对机壳的绝缘电阻

绝缘电阻测试应按照以下步骤进行：

- 绝缘电阻试验应分别在电机系统实际冷状态或热状态下进行，可在温升试验或高低温试验后，含湿热试验后试验。常规测试时，绝缘电阻仅在实际冷状态下测量。
- 测量绝缘电阻时，应记录被试样品环境温度，在实际冷状态下测量，被试样品宜处于温度平衡状态。电机系统在热状态下或冷却回路通有冷却液下测量绝缘电阻时，环境温度应为被试样品空间温度或冷却液温度。应在仪表指针或显示数值达到稳定后再读取数值，并记录工作环境温度和湿度。
- 绝缘电阻测量结束后，每个回路应对接地的机壳作电气连接放电。

定子绕组对机壳的绝缘电阻测试步骤如下：

- 各绕组始末端单独引出时，应分别测量各绕组对机壳的绝缘电阻，不参加试验的其他绕组和埋置的检温元件等应与铁心或机壳作电气连接，机壳应接地。当中性点连在一起不易分开时，应测量所有连在一起的绕组对机壳的绝缘电阻。

5.1.7.2 电机定子绕组与温度传感器的绝缘电阻

用 250V 兆欧表分别测量定子各引线和温度传感器之间的绝缘电阻，不参加试验的部件应与机壳做电气连接，机壳应接地。

5.1.8 绕组匝间冲击耐电压

绕组匝间冲击耐电压的测试步骤如下：

- 电枢绕组匝间绝缘冲击试验电压峰值不应低于中公式 (2) 计算值，并按四舍五入修约到百数位 (百伏) 数值。
- 电机绕组匝间耐压试验冲击试验应在专用匝间耐压试验冲击试验台上进行，冲击电压的波前时间可为 0.2 微秒 (us，容差±30%) 和 1.2us (容差±30%)，宜采用 0.2us。

5.1.9 电机绕组对机壳的工频耐电压

按照以下要求开展：

- a) 该试验应在电机静止状态下在工频耐压仪上进行，试验前应采取安全防护措施，并测量绕组的绝缘电阻。
- b) 试验前，应将旋转变压器和温度传感器等端子均与机壳连接，机壳应接地。电压应施加于绕组和机壳之间，试验电压的频率为工频。
- c) 当电枢绕组各相或各支路始末端单独引出时，应分别试验。相绕组的中性点不易分开时，三相绕组应同时施加电压。
- d) 按表 1 规定的全值试验电压加载于电机绕组和机壳。施加电压应不超过试验电压全值的一半开始，然后以不超过全值 5% 的速度均匀地或分段增加至全值，电压自半值增加至全值的时间不应少于 10s，全值试验电压应持续 1min。试验完毕，待电压下降到全值的 1/3 以下时，方可断开电源，并将被试绕组放电。
- e) 在试验过程中，发现电压或漏电流急剧增加，绝缘冒烟或发生响声等异常现象时，应立即降低电压，断开电源，将被试绕组放电后再对绕组检查。记录试验过程中漏电流。

5.1.10 绕组对温度传感器的工频耐电压

电机温度传感器固定于定子绕组中，应进行绕组对温度传感器的耐电压试验。旋转变压器端子均应与机壳连接，机壳应接地；记录试验过程中漏电流。

注：用力矩扳手测得的转矩值实际为摩擦转矩和齿槽转矩的和，测得值可等同于齿槽转矩。

5.2 转速

转速试验应按照如下步骤进行：

- a) 超速试验采用原动机拖动法，宜在电机运转至轴承润滑均匀后开始超速试验。超速试验前应检查电机转动部分等的装配质量，应采取防护措施。
- b) 超速试验时，对被试电机的控制及对振动、转速和轴承温度等参数的测量应采用远距离测量方法。
- c) 试验时，被试电机在控制器的控制下，匀速旋转至 1.2 倍最高工作转速，并在此转速点空载运行不低于 2min。
- d) 升速过程中，当电机达到额定转速时，应观察电机运转情况，确认无异常现象后，再提高转速，直至规定的转速。
- e) 超速试验后检查电机转动部分应无损坏或产生有害变形，不应出现紧固件松动等现象。

5.3 温升

将电机安装在专用试验台上，在规定冷却条件下额定工况运行至热平衡状态，测量电机绕组温升。批量生产时，不平衡温升可在规定试验条件下测定。

5.4 噪声

将电机固定在专用试验台，配套控制器进行额定转速空载试验，测定 1m 球半径处噪声。环境噪声应低于空载噪声 6dB(A) 以上，环境噪声应低于空载噪声不到 6dB(A)，应对以上空载噪声修正。

5.5 零位角度

5.5.1 零位

零位角度有以下两种通电方法进行检验：

a) V-W 通电法

将电机水平放置在专用试验台上，低压信号线同专用试验台连接，将 U 端悬空，设定恒流源电流保护限值，沿 V-W 方向通入额定电流 25%~50% 倍的直流电流以锁住电机转子，标准解码器读出角度为电机零位角度为 90° 电角度，如图 3 示。

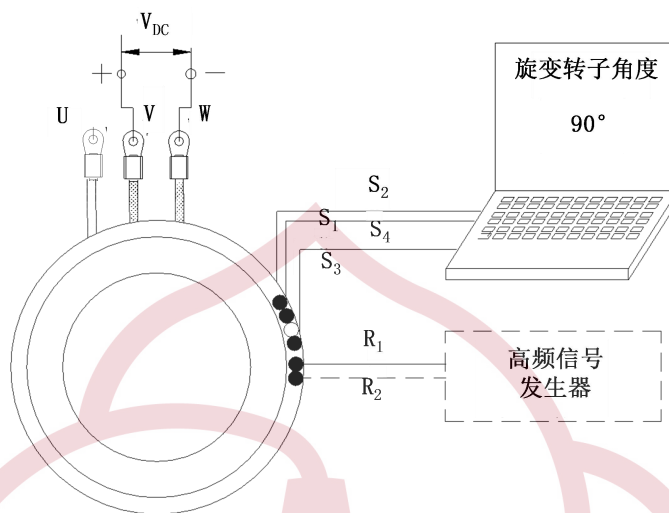


图3 旋变零位 VW 测试

b) U-VW 通电法

将电机水平放置在专用试验台上，低压信号线同专用试验台连接，将 VW 短接，设定恒流源保护限值，沿 U-VW 方向通入额定电流 25%~50% 倍的直流电流以锁住电机转子，标准解码器读出角度为电机零位角度为 0° 。

5.5.2 动态测试

将电机安装在专用试验台架上，台架拖动电机转子沿电机驱动方向按 20%~25% 倍额定转速匀速旋转，一般相电势 E_u 同旋转变压器正弦信号包络线同相位或 E_{vw} 同旋转变压器余弦信号包络线同相位，图示零位角为 0° 。

5.6 反电势

将电机安装在专用试验台架上，将 U、V 两端子通过隔离探头连接示波器，并将示波器共地连接。台架拖动电机转子沿电机驱动方向按 20%~25% 倍额定转速匀速旋转，正确位置线反电势波形如图 4 示，以 W 为公共端时 U_{uw} 超前 U_{vw} 相位 60° (图 4b)。将台架转速提升至额定转速，测量并记录电机线反电势。

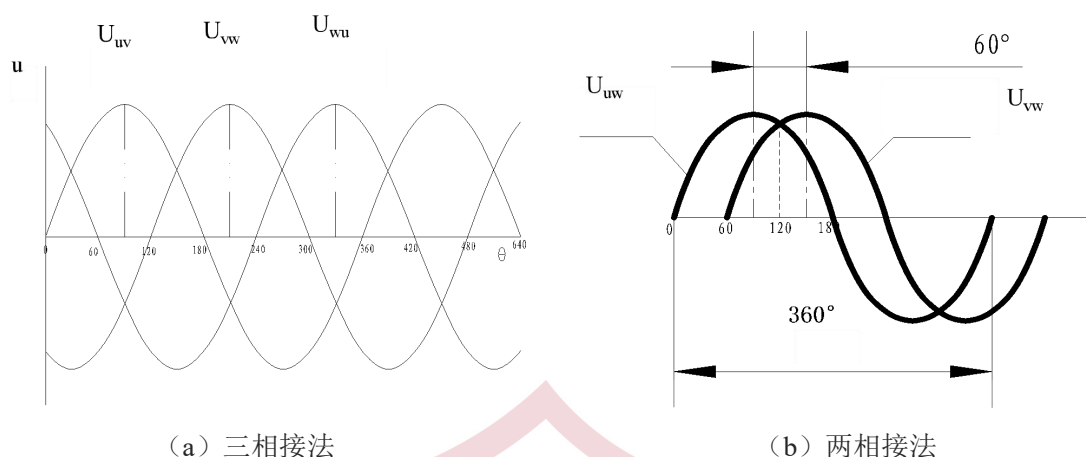


图4 相序波形示意图

5.7 驱动特性

试验应按照以下步骤进行：

- 将电机安装在测功机上，接通冷却回路，按产品设计要求液温试验。配套控制器、功率分析仪在额定母线电压下对各种转速、扭矩工况试验，测定电机转速、扭矩、输入功率、输出功率、效率、相电流、相电压，试验完毕，绘制转速-扭矩曲线族和效率 map 图。
- 转速-扭矩曲线族之间转速间隔应按不高于 500r/min、扭矩间隔不高于 10Nm 确定。

5.8 堵转性能

5.8.1 电机独立试验

试验步骤如下：

- 在专用台架上实际冷状态下配合恒流源进行，将电机 VW 端子短接，恒流源沿 U-VW 方向通电并驱动电机转子锁死，转子电角度为 0° 位置，如图 5a) 示。
- 正式堵转试验测试时，将 U 端子悬空，重新接线并设定恒流源保护限值，恒流源沿 V-W 方向通电；通电时间 1~3s，记录堵转转矩、堵转电流，如图 5b) 示。
- 试验应改变接线端子和转子的相对位置，按电机相序方向有序调整接线位置，使相应转子锁住、堵转测试接线位置较前一次正向转动 120° 电角度。重新接线、定位、锁死、测试，共 3 次试验，应取 3 次测量中堵转转矩的最小值作为堵转转矩。

5.8.2 驱动系统堵转试验

驱动系统堵转试验应按照以下步骤进行：

- 匹配控制器在实际冷状态下进行，在专用台架上将驱动电机转子锁死。通过电机控制器施加堵转转矩指令，测量堵转转矩，记录堵转时间。应改变定子和转子的相对位置，沿圆周方向等分取 5 个堵转点，分别重复以上试验，应取 5 次测量中堵转转矩的最小值作为堵转转矩。
- 控制器在额定电压下运行，通电时间 1~3s，记录转矩传感器的转矩、电源母线电流。

5.9 驱动电机空载损耗

试验应按照以下步骤进行：

- 试验在实际冷状态下进行，将驱动电机拖动至规定转速，记录转矩转速传感器的转矩、转

速和功率，该功率值为该转速下的驱动电机空载损耗。在转速范围内均匀取至少 5 个转速点，应包括最高工作转速。

b) 试验后绘制损耗和转速的关系曲线。

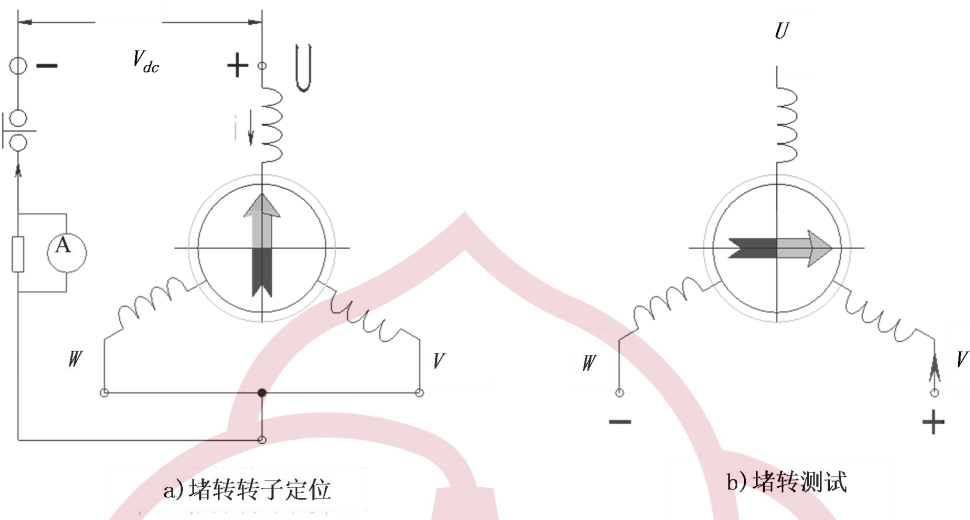


图 5 堵转试验定位与测试

5.10 齿槽转矩试验

将驱动电机平稳放置，随机选择 3 个不同的转子位置，在各位置上使用较小量程的力矩扳手分别将转子正、反方向转动。读取并记录转子开始转动又不连续转动时的力矩扳手显示数值最大值。取所有力矩值中最大值作为电机的齿槽转矩。也可采用挂砝码测试方式。

注：用力矩扳手测得的转矩值实际为轴承摩擦转矩和齿槽转矩的和，轴承摩擦转矩可忽略，将测得值等同于齿槽转矩。

5.11 转矩脉动

转矩脉动检验应按照以下步骤进行：

- a) 试验在实际冷状态下进行，驱动电机系统处于正常电气连接状态和产品技术文件规定的冷却条件下，直流母线上施加额定电压。
- b) 在圆周上均匀选取 5 个点，分别将转子固定在各个转子位置，控制器施加规定转矩指令，分别测试堵转转矩值。测试值中最大转矩与最小转矩之差为转矩脉动。

注：该方法仅为对非弱磁区域转矩脉动的近似测量方法，且未计及转动引起的位置传感器反馈角度误差的影响。

5.12 最高工作转速

试验步骤如下：

- a) 将电机固定在专用试验台，配套控制器试验。控制器直流母线电压设定为额定电压，电机系统可工作于电动状态。
- b) 匀速调节电机的转速至最高工作转速，并施加不低于制造商规定的负载。
- c) 每 30s 记录一次控制器的输入电压、电流和功率，以及电机轴端的转速和转矩。必要时，可按附录 A 的方法对转矩试验结果修正。3min 内转速降低时，应以转速最低值作为电机的最高工作转速。

5.13 动态响应

试验步骤如下：

- a) 电机配套控制器在电机堵转状态下进行，控制器直流母线电压设定为额定电压，被试电机系统宜处于热态，设定目标转矩为额定转矩。在堵转状态下对电机转矩控制，使电机输出转矩从零快速变化至额定转矩值，记录电机转矩变化从 10%额定转矩值至 90%额定转矩值区间的时间变化量。
- b) 试验时，应改变定子和转子的相对起始位置，沿圆周方向等分取 5 个点，分别重复以上试验，取 5 次测量中时间变化量最大值作为转矩响应时间。
- c) 对于无转矩闭环控制的电机系统，可不进行该项试验。

5.14 馈电试验

将电机安装在专用试验台上，试验应按 GB/T 18488.2 执行。

5.15 短路试验

对称短接驱动电机三相绕组，接通电机冷却系统按规定流量对电机冷却，将驱动电机转子拖动到额定转速，测试相电流有效值为短路电流。

5.16 退磁试验

5.16.1 高温退磁

高温退磁应在温升试验后进行，增大电机负载，使电机绕组热平衡温度达到 155℃，停机后立即测试电机热态反电势，电机完全冷却后再测试冷态反电势。

5.16.2 强制退磁

5.16.2.1 直流退磁系统

试验步骤如下：

- a) 由恒流直流电源、接触器、连接电缆和驱动电机构成退磁系统。由交流电源、接触器、变压器、连接电缆和驱动电机构成退磁系统。
- b) 将电机安装在台架上，恒流源沿 V-W 方向通入 25%~30%倍额定电流，并锁死电机转子。通电时间不超过 5min。
- c) 电机转子锁死后，重新接线，如图 6 示。反向沿 W-V 通入短路电流 5 倍的退磁电流，单次通电时间 0.5s，通电间隔 5min，试验共 3 次。

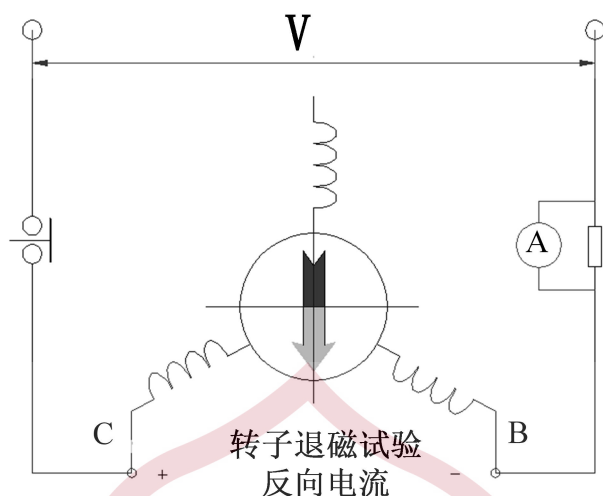


图 6 直流退磁试验

5.16.2.2 抗退磁能力

退磁试验完成，测试电机空载反电势，并记录。

5.17 安全性

安全接地检查方法和量具应按 GB/T 13422 执行。

5.18 环境适应性

5.18.1 低温

低温试验应按 GB/T18488.2 执行。

5.18.2 高温

高温试验应按 GB/T18488.2 执行。

5.18.3 湿热性能

湿热性能试验应按 GB/T18488.2 执行。

5.18.4 耐振动

耐振动试验应按 GB/T10068 执行。

5.18.5 防护性能

防护性能符合以下要求：

- 模拟整机实际安装状态，整机在专用测试台上进行。将驱动电机高压、低压、安装止口等接口用专用工装堵住，不应产生影响密封性能的变形。通过呼吸阀向电机内部充入试验气体介质，逐渐加压至 GB/T 18488.1 规定的试验压力，保压，测量泄漏量。
- 也可按 GB/T4942.1 和 GB/T4942.2 执行。

- c) 当气体检测存在争议时,仲裁试验应采用沉水检测,电机表面同水箱温度差不应高于 5K。将试验工装装在密封接口位置,将冲气管接在呼吸阀位置,充气压力调整至 15kPa 后,再放入水箱中并全部淹没。待水面平静后,观察电机应无气泡冒出,并记录。试验完毕,电机离开水面后方可停止充气;吹进电机表面水珠后方可拔出充气管。

5.18.6 盐雾

盐雾试验应按 GB/T18488.2 执行。

5.18.7 温度冲击

试验步骤如下:

- a) 电机在低温-40℃和高温 85℃下的暴露时间应为 2 小时,温度转换时间应小于 30s,温度循环周期 4 小时,温度循环次数 10 个循环。
- b) 试验后,箱内复测绝缘电阻应符合 4.1.4.1 的规定。恢复常态后,电机匹配控制器应在额定电压、额定转速、额定功率下正常工作。

5.18.8 凝露试验

将电机安装在专用试验台上,环境温度设定为-5℃。在规定冷却条件下额定工况运行至热平衡状态停机,8 小时后检查电枢绕组、温度传感器、旋转变压器绝缘电阻,并检查高压室、低压室水珠凝露情况,通电检查空载运行情况。

5.19 电磁兼容性

电磁兼容性试验应按 GB/T 18488.2 或 GB 14023 和 GB/T 17619 执行。

5.20 可靠性

试验步骤如下:

- a) 将驱动电机安装在专用台架上进行对拖试验,按 GB/T29307 规定进行截尾试验,记录试验时间、发生故障、故障发生时间,截尾试验完毕计算并评定驱动电机平均首次故障时间、平均故障间隔时间。
- b) 可靠性试验完毕,检查电机绝缘性能,重新将驱动电机安装在测功机上进行空载、噪声及驱动特性试验。

5.21 扭转疲劳性能

5.21.1 转子固紧锁死

悬空 U 端子,按端子 W+V-方向通电,给转子定位,机械固紧并锁死转子此时位置,如图 7 示。给旋变施加 7.1v@10k 激励,读取转子锁死时位置角度,确保显示电角度-90±5°。

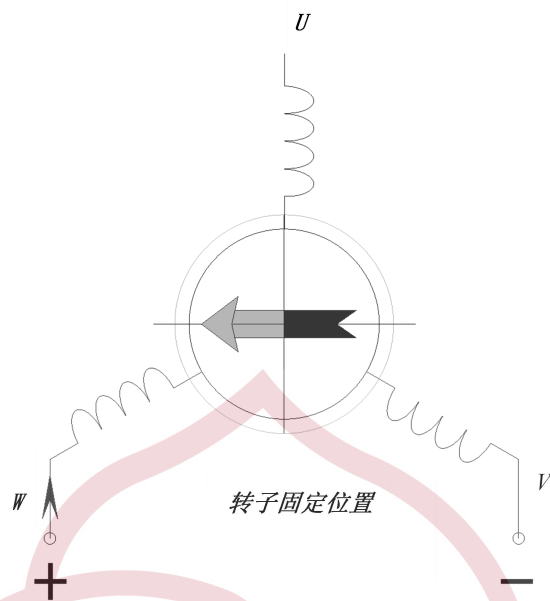


图 7 疲劳扭转定位接线图

5. 21. 2 负载预置

按图 10 重新接线，正向 UV-W 方向通电，使定子相当角度减小直至 90°电角度位置。设定恒流源电流保护限值，测定稳态扭矩，每次测定维持 1-3s。对比目标扭矩和实测扭矩，调整设定电流，直至实测扭矩符合设定要求。预置完成后，再进行 3 次测试，平均值作为预置值。

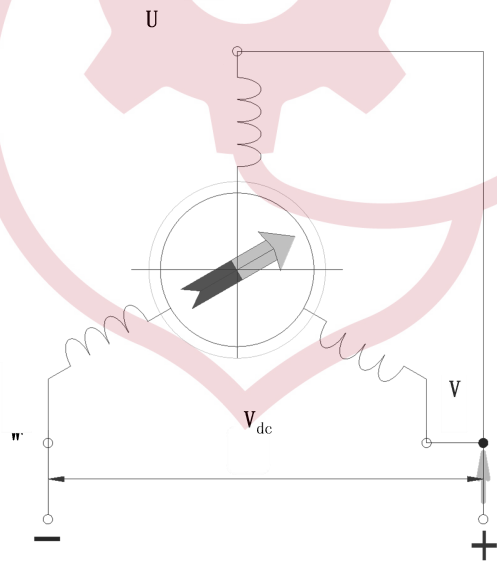


图 8 疲劳扭转定位接线图

5. 21. 3 正向扭转

重新按图 11 接线，按 90°方式扭转。驱动电机正向 U-VW 通电转子正向扭转，维持 0.5s。

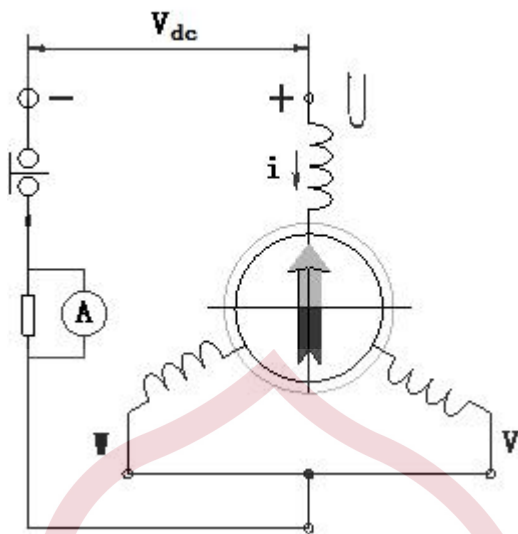


图 9 正向扭转接线图

5. 21. 4 反向扭转

驱动电机 VW-U 方向通电使转子反向扭转，如图 10 示，维持 0.5s。

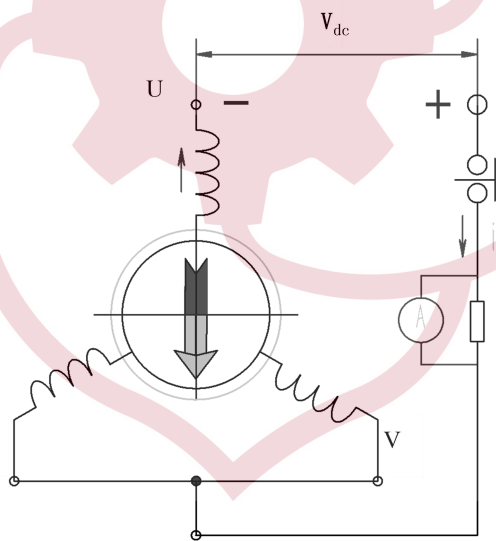


图 10 反向扭转接线图

5. 21. 5 扭转疲劳

电机应在正常冷却条件下进行。正向扭转 0.5s 后，断开 U-VW 电路；VW-U 方向通电使转子反向扭转，维持 0.5s；交替扭转进行疲劳试验，如图 11 示。扭转周期共 2s,扭转周期结束，进入下一循环。

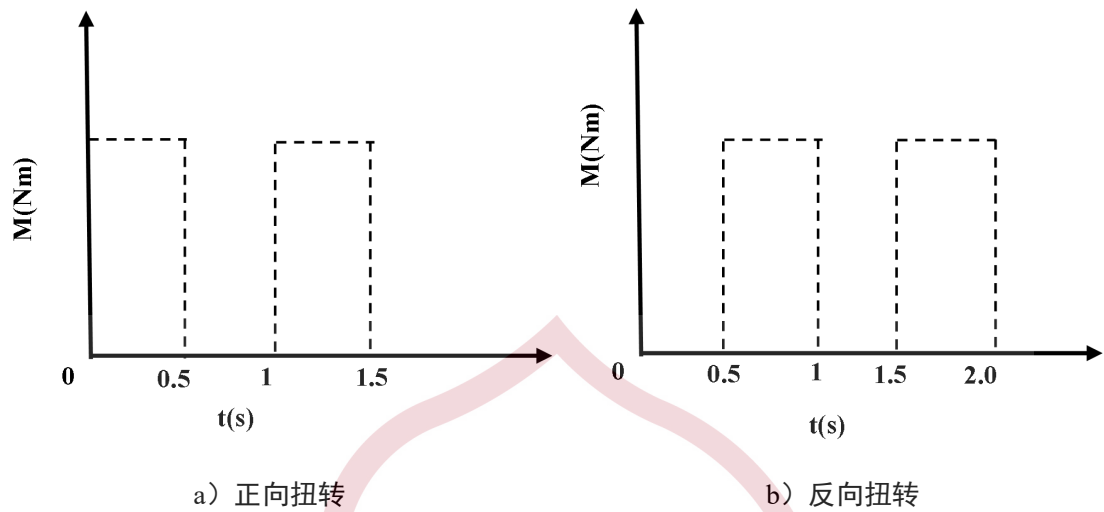


图 11 扭转疲劳负荷图

5.22 耐久性

试验步骤如下：

- a) 将驱动电机安装在专用台架上进行对拖试验，负载工况参考 GB/T 29307。
- b) 主机有规定时，也可按主机规定耐久工况进行耐久试验。
- c) 耐久性试验完毕，检查电机绝缘性能，重新将驱动电机安装在测功机上进行空载、噪声及驱动特性试验。

6 检验规则

6.1 检验分类

检验应分为出厂检验和型式检验，检验分类应符合附录 A 的规定。

6.2 出厂检验

电机及控制器应经逐台检验合格，并附合格证后方可出厂。检验项目应符合附录 A 的规定。

6.3 型式检验

具备下列条件之一时，应进行型式检验：

- a) 新产品或老产品转厂生产的试制定型鉴定时；
- b) 正常生产每 2 年应周期性检验一次；
- c) 正式生产后，结构、材料、工艺改变，可能影响产品性能时；
- d) 停产 1 年后，恢复生产时；
- e) 出厂检验结果与上次型式检验结果有较大差异时。

6.3.1 抽样

型式检验应从出厂检验合格的产品中抽取。抽样数量应为 6 套，其中 4 套供型式检验，另 2 套保存备用。

6.3.2 检验程序

检验项目及样机编号应符合附录 A 的规定。

6.3.3 判定规则

6.3.3.1 合格

型式检验用样机的全部项目检验符合规定，应判定型式检验合格。

6.3.3.2 不合格

有一台样机的任一检验项目不符合规定，应判定型式检验不合格。

6.3.3.3 偶然失效

确认样机失效属于偶然失效时，允许在每次提交 2 套备用样机中抽 1 套代替失效样机，并补做失效发生前、失效时的试验，然后继续试验，再有 1 套样机的任一检验项目不符合规定，应判定为不合格。

6.3.3.4 性能降低

样机经环境试验，允许出现不影响使用的性能降低。性能降低允许值应为 5%，或符合产品设计要求。

7 标志

7.1 系列号

电机壳体应有永久性系列号标识，深度不应低于 0.2mm 或符合产品设计要求。

7.2 电机铭牌

电机铭牌宜包括下列信息：

- a) 制造商名称；
- b) 型号、编号、名称；
- c) 主要参数：额定功率、额定电压、额定转速、相数、工作制、冷却方式、峰值功率、最高工作转速、绝缘等级、防护等级。

7.3 引出线和接线端

引出线和接线端宜包括下列信息：

- a) 电机壳体应有永久性系列号标识，深度不应低于 0.2mm。电机三相线或接线端应有明显的标志，并应符合 GB 1971 的规定；接线盒处永久标记应为 U、V、W。
- b) 电机自带三相线时，电缆颜色应分别为黄绿红，对应动力接线端永久标记应为 U、V、W。

7.4 高压警示

电机应在醒目位置注明“压危险字样，必要时在高压危险字样旁边注明安全操作提示。

附 录 A
(资料性附录)

A.1 检验应分为出厂检验和型式检验，并应符合表 A.1 的规定。

表 A.1 检验分类

检验项目				技术要求	试验方法	出厂 检验 项目	型式检验	
							检验 项目	样机编号
一 般 性 要 求	外观			4.1.1	5.1.2	√	√	1,2,3,4
	外形和安装尺寸			4.1.1	5.1.3	√	√	1,2,3,4
	质量			4.1.1	5.1.4	-	√	1,2,3,4
	液冷系统冷却回路密封性能			4.1.2	5.1.5	√	√	1,2,3,4
	定子绕组冷态直流电阻			4.1.3	5.1.6	√	√	1,2,3,4
	绝 缘 电 阻	定子绕组对机壳的绝缘电阻		4.1.4.1	5.1.7.1	√	√	1,2,3,4
		定子绕组对温度传感器的绝缘电阻		4.1.4.2	5.1.7.2	√	√	1,2,3,4
	耐 电 压	定子绕组的匝间冲击耐电压		4.1.5.1	5.1.8	√	√	1,2,3,4
		工 频 耐 电 压	定子绕组对机壳的工频耐电压	4.1.5.2	5.1.9	√	√	1,2,3,4
			定子绕组对温度传感器的工频耐电压	4.1.5.3	5.1.10	√	√	1,2,3,4
转速			4.2	5.2	-	√	1,2,3,4	
温升				4.3	5.3	-	√	1,2,3,4
噪声*				4.4	5.4	√	√	1,2,3,4
驱 动 特 性	工作电压范围*			4.7.1	5.7	-	√	1,2,3,4
	转矩—转速特性*			4.7.2	5.7	-	√	1,2,3,4
	持续转矩*			4.7.3	5.7	-	√	1,2,3,4
	持续功率*			4.7.3	5.7	-	√	1,2,3,4
	峰值转矩*			4.7.4	5.7	√	√	1,2,3,4

	峰值功率*		4.7.4	5.7	-	√	1,2,3,4
	堵转转矩*		4.8	5.8	√	√	1,2,3,4
	最高工作转速*		4.12	5.12	-	√	1,2,3,4
	驱动电机系统效率	电机系统最高效率*	4.7.5.1	5.7	-	√	1,2
		电机系统高效工作区*	4.7.5.2	5.7	-	√	1,2
	响应时间	转速响应时间*	4.13	5.13	-	√	1,2
		转矩响应时间*	4.13	5.13	-	√	1,2
	馈电特性*		4.14	5.14	-	√	1,2
	初始位置角度		4.5	5.5	√	√	1,2,3,4
	空载反电势总谐波畸变		4.6	5.6	-	√	1,2,3,4
	最大空载线反电势限值		4.6	5.6	-	√	1,2,3,4
	空载线反电势容差		4.6	5.6	√	√	1,2,3,4
	齿槽转矩		4.10	5.10	-	√	1,2,3,4
	转矩脉动		4.11	5.11	-	√	1,2,3,4
	驱动电机系统空载损耗		4.14	5.14	-	√	1,2,3,4
	驱动电机空载损耗		4.14	5.14	-	√	1,2,3,4
安全性	安全接地检查		4.17.1	5.17	√	√	1,2
	稳态短路电流限值		4.17.1	5.17	-	√	1,2
	稳态短路电流容差		4.17.1	5.17	-	√	1,2
	永磁体退磁		4.16	5.16	-	√	3,4
环境适应性	低温储存		4.18.1.1	5.18	-	√	1,2
	低温工作		4.18.1.2	5.18	-	√	1,2
	高温储存		4.18.2.1	5.18	-	√	1,2
	高温工作		4.18.2.2	5.18	-	√	1,2
	温度冲击试验		4.18.3	5.18	-		3
	湿热		4.18.4	5.18	-	√	4
	耐扫频振动		4.18.8.1	5.18	-	√	4
	耐随机振动		4.18.8.2	5.18	-	√	4
	防水、防尘		4.18.5	5.18	-	√	1
	盐雾		4.18.6	5.18	-	√	4
	凝露		4.18.7	5.18	-	√	1,2,3,4
	电磁兼容性	电磁辐射骚扰*	4.19.1	5.19	-	√	3
		电磁辐射抗扰性*	4.19.2	5.19	-	√	3
可靠性*			4.20	5.20	-	√	3
扭转疲劳			4.21	5.21	-	√	4
耐久性			4.22	5.22	-	√	1,2
备注：1）右上角标注*的项目，同控制器匹配测试； 2）右上角标注△的项目，分解电机对电枢测试。							

A. 2 驱动电机原理如图 A.1 所示。

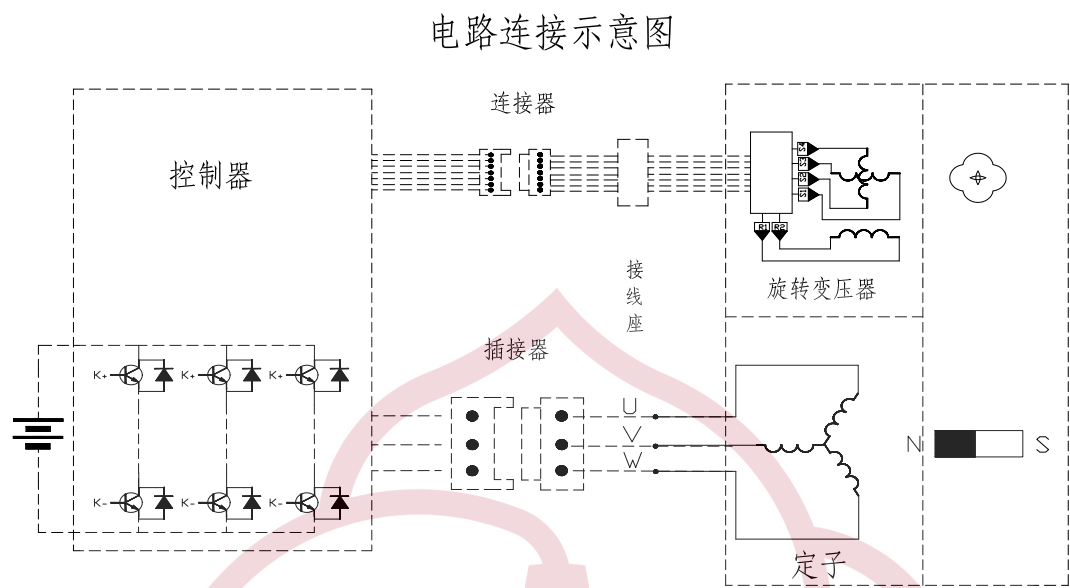


图 A.1 驱动电机原理