

T/TMAC

团 体 标 准

T/TMAC XXXX—2025

航空垂直起降器 (eVTOL) 用永磁同步电机

Permanent magnet synchronous motor for aviation vertical take-off and landing
vehicle (eVTOL)

2025 - XX - XX 发布

2025 - XX - XX 实施

中国技术市场协会 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 分类 1

5 一般要求 2

6 技术要求 2

 6.1 外观 2

 6.2 功率密度 2

 6.3 转矩密度 2

 6.4 效率 2

 6.5 平均无故障时间 3

 6.6 温升幅度 3

 6.7 振幅 3

 6.8 防护等级 3

 6.9 耐腐蚀性 3

 6.10 耐机械冲击 3

 6.11 电磁干扰性 3

 6.12 噪声 4

 6.13 电气性能 4

 6.14 超速 4

 6.15 环境适应性 4

7 试验方法 4

 7.1 试验条件 4

 7.2 外观 4

 7.3 功率密度 4

 7.4 转矩密度 4

 7.5 效率 5

 7.6 平均无故障时间 5

 7.7 温升幅度 5

 7.8 振幅 5

 7.9 防护等级 5

 7.10 耐腐蚀性 5

 7.11 耐机械冲击 5

 7.12 抗电磁干扰性 5

 7.13 噪声 6

 7.14 电气性能 6

 7.15 超速 6

7.16 环境适应性 6

8 检验规则 6

8.1 检验分类 6

8.2 检验项目 6

8.3 出厂检验 7

8.4 型式检验 7

8.5 组批 7

8.6 抽样 7

8.7 判定规则 7

9 标志、包装、运输和贮存 7

9.1 标志 7

9.2 包装 7

9.3 运输 8

9.4 贮存 8

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。

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。

本文件由上海电气集团上海电机厂有限公司提出。

本文件由中国技术市场协会归口。

本文件起草单位：

本文件主要起草人：

航空垂直起降器(eVTOL)用永磁同步电机

1 范围

本文件规定了航空垂直起降器(eVTOL)用永磁同步电机的技术要求、试验方法、检验规则、标志、包装、运输和贮存。
本文件适用于航空垂直起降器(eVTOL)用永磁同步电机（以下简称“电机”）。

2 规范性引用文件

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

- GB/T 2828.1 计数抽样检验程序 第1部分：按接收质量限（AQL）检索的逐批检验抽样计划
- GB/T 2900.25 电工术语 旋转电机
- GB/T 2900.83 电工术语 电的和磁的器件
- GB/T 4942 旋转电机整体结构的防护等级（IP代码） 分级
- GB/T 5080.7 设备可靠性试验 恒定失效率假设下的失效率与平均无故障时间的验证试验方案
- GB/T 10125 人造气氛腐蚀试验 盐雾试验
- GB/T 18655 车辆、船和内燃机 无线电骚扰特性 用于保护车载接收机的限值和测量方法
- GB/T 21437.2 道路车辆 电气/电子部件对传导和耦合引起的电骚扰试验方法 第2部分：沿电源线的电瞬态传导发射和抗扰性
- GB/T 33014.2 道路车辆 电气/电子部件对窄带辐射电磁能的抗扰性试验方法 第2部分：电波暗室法
- GB 34660 道路车辆 电磁兼容性要求和试验方法
- GB/T 42284.3 道路车辆 电动汽车驱动系统用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 42284.4 道路车辆 电动汽车驱动系统用电气及电子设备的环境条件和试验 第4部分：气候负荷

3 术语和定义

GB/T 2900.25、GB/T 2900.83界定的术语和定义适用于本文件。

3.1

S1工作制 S1 work system

即连续工作制，是指电动机在额定电压、额定频率和额定功率下，能够长时间连续运行而不出现损坏或性能下降的工作状态。

4 分类

分类应符合表1的规定。

表 1 分类

-	低功率等级	中功率等级	高中功率等级
功率/kW	<50	50~200	200~500

5 一般要求

5.1.1 工作制

电动机的工作制为连续定额（S1）。

5.1.2 电路图

电动机由驱动器和电动机本体(包括位置传感器)两部分组成，其电路图如图1所示。

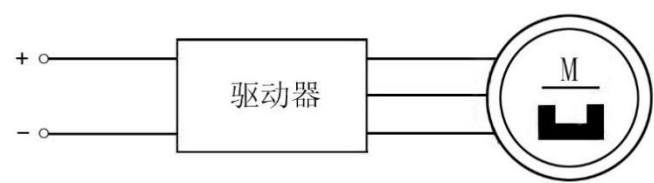


图 1 电路图

6 技术要求

6.1 外观

电动机表面不应有锈蚀、碰伤、划痕，涂覆层不应有剥落，紧固件连接应可靠，引出线或接线端应完整无损，颜色和标志应正确、牢固，铭牌字迹内容清楚无误，且不得脱落。

6.2 功率密度

功率密度应符合表2的规定。

表 2 功率密度

-	低功率等级	中功率等级	高中功率等级
连续工作功率密度/（kW/kg）	3.5~4.5	4.5~5.0	5.0~6.8
峰值功率密度/（kW/kg）	5.0~6.5	6.5~8.0	8.0~10.0

6.3 转矩密度

转矩密度应符合表3的规定。

表 3 转矩密度

-	低功率等级	中功率等级	高中功率等级
转矩密度	5.0~8.5	8.5~18.0	18.0~36.4

6.4 效率

6.4.1 额定工况效率

额定工况效率应符合表4的规定。

表 4 额定工况效率

-	低功率等级	中功率等级	高中功率等级
η_1	$\geq 93\%$	$\geq 94\%$	$\geq 95\%$
η_2	$\geq 92\%$	$\geq 93\%$	$\geq 94\%$
η_3	$\geq 95\%$	$\geq 95\%$	$\geq 96\%$

注： η_1 ——额定电压下的综合效率；
注： η_2 ——额定转速下的综合效率；
注： η_3 ——额定负载下的综合效率。

6.4.2 部分负载效率

部分负载效率应符合表5的规定。

表 5 部分负载效率

-	低功率等级	中功率等级	高中功率等级
部分负载效率 (20%~100%额定负载)	85%~93%	88%~95%	90%~96%

6.5 平均无故障时间

平均无故障时间应符合表6的规定。

表 6 平均无故障时间

-	低功率等级	中功率等级	高中功率等级
平均无故障时间/h	≥ 8000	≥ 15000	≥ 20000

6.6 温升幅度

温升幅度应符合表7的规定。

表 7 温升幅度

-	低功率等级	中功率等级	高中功率等级
温升幅度/K	≤ 60	≤ 45	≤ 35

6.7 振幅

振幅应符合表8的规定。

表 8 振幅

-	低功率等级	中功率等级	高中功率等级
振幅/ (mm/s)	≤ 2.5	≤ 1.5	≤ 1.0

6.8 防护等级

电动机的防护等级应达到GB/T 4942规定的IP67级别。

6.9 耐腐蚀性

盐雾试验后，任何部位不应有明显腐蚀和破坏性变质，且性能应符合本文件规定。

6.10 耐机械冲击

试验后，性能应符合本文件规定。

6.11 电磁干扰性

6.11.1 电磁辐射发射

应符合GB34660中4.5和4.6的规定。

6.11.2 电磁辐射抗扰度

辐射抗扰度应符合GB34660的4.7中大电流注入(BCI)法和电波暗室法的要求。

6.11.3 电源线瞬态传导抗扰度

电源线瞬态传导抗扰度应符合GB34660中4.8的要求,其中脉冲4仅适用于使用12 V或24 V电源启动发动机的混合动力汽车用驱动电机系统,

6.12 噪声

电动机额定电压条件下空载运行时,A计权声功率级,应不大于70 dB。

6.13 电气性能

6.13.1 绝缘电阻

直流端动力端子与外壳、直流端动力端子与信号端子之间的绝缘电阻均不应小于1 MΩ。

6.13.2 耐电压

耐电压试验后,性能应符合本文件规定。

6.14 超速

电机应能承受不低于1.1倍额定工作转速,持续时间不应小于2 min,试验后性能应符合本文件规定。

6.15 环境适应性

6.15.1 耐高温

应能在55℃,持续工作2 h,试验后性能应符合本文件规定。

6.15.2 耐低温

应能在-40℃,持续工作不少于0.5 h,试验后性能应符合本文件规定。

6.15.3 耐湿热

非运行状态下应能承受单次300 min,5次湿热循环。

7 试验方法

7.1 试验条件

- a) 环境温度: 15℃~55℃;
- b) 湿度: 45%RH~75%RH;
- c) 气压: 86 kPa~106 kPa。

7.2 外观

外观应使用目视法检查,结果应符合4.1的规定。

7.3 功率密度

电机连续工作功率密度测试需在额定工况下运行至热平衡,使用高精度功率分析仪记录输入功率,同时用电子秤测量电机质量。峰值功率密度测试需在短时过载条件下重复上述步骤,并取最大值。功率密度计算公式见公式(1)。

$$P = \frac{P_{连续}}{m_{电机}} \dots\dots\dots (1)$$

式中:
P-----功率密度;
P_{连续}-----连续功率;
m_{电机}-----电机质量。

7.4 转矩密度

将电动机固定于转矩测试台，在额定转速下施加负载至额定转矩，使用非接触式转矩传感器测量输出转矩，结合电机质量计算转矩密度（N·m/kg）。测试需重复3次取平均值，且每次间隔时间需确保电机冷却至初始温度。

7.5 效率

7.5.1 额定工况效率

在（25±2）℃温控实验室中，电机连接驱动器，输入额定电压和频率，通过功率分析仪同步采集输入电功率和输出机械功率（含驱动器损耗）。

$$\eta = \left(\frac{P_{out}}{P_{in}} \right) \times 100\% \dots\dots\dots (1)$$

式中：
η——综合效率；
P_{out}——输出功率；
P_{in}——输入功率。

7.5.2 部分负载效率

在20%~100%额定负载范围内，每隔10%负载点测试效率，使用可编程电子负载模拟不同工况，绘制效率曲线并验证是否符合最低90%要求。

7.6 平均无故障时间

采用加速寿命试验法，依据GB/T 5080.7在高于额定温度20℃和1.2倍额定功率高负载条件下连续运行电机，记录故障间隔时间，通过威布尔分布模型推算实际平均无故障时间值。

7.7 温升幅度

在密闭温控舱内，电机额定工况下运行至温度变化不大于1℃/h热稳定，使用温度精度±0.5℃的PT100温度传感器监测定子绕组和外壳温度。绝缘等级H级对应的温升限值为125 K，测试结果需包含至少3组数据取平均值，温升幅度按下列公式计算：

$$T_{rise} = T_{steady} - T_{amb} \dots\dots\dots (1)$$

式中：
T_{rise}——温升幅度；
T_{steady}——稳定温度；
T_{amb}——环境温度。

7.8 振幅

电机空载运行时，采用频率范围5 Hz~10 kHz的三轴振动传感器安装于机身表面，测量振动速度有效值。背景振动应低于被测值的20%。数据采集时间不应小于1 min，取最大振动速度值作为结果。

7.9 防护等级

应按GB/T 4942中IP54级别的规定，使用滑石粉模拟粉尘，持续8 h以5.6 L/min流量喷淋外壳各方向10 min。试验后拆解电机，检查内部无粉尘或水渍侵入，且绝缘电阻不低于100 MΩ。

7.10 耐腐蚀性

应按GB/T 10125的规定执行，将电机置于5% NaCl溶液，（35±2）℃盐雾试验箱，连续喷雾48 h。试验后目视检查表面及内部金属部件，无可见腐蚀斑点，且防护涂层无起泡或脱落。关键部位需进一步用金相显微镜观察微观腐蚀情况。

7.11 耐机械冲击

耐机械冲击试验应按GB/T 42284.3的规定执行。

7.12 抗电磁干扰性

7.12.1 电磁辐射发射

试验应按GB/T 18655的规定执行。

7.12.2 电磁辐射抗扰度

大电流注入法试验应按GB/T 33014.2的规定执行；电波暗室法试验应按GB/T 33014.2的规定执行。

7.12.3 电磁线瞬态传导抗扰度

试验应按GB/T 21437.2的规定执行。

7.13 噪声

在消音室中，电机空载运行至稳定状态，声级计（A计权）距电机1 m处多点测量，取最大值作为声功率级。测试需排除环境振动干扰，且麦克风方向与电机轴线成90°，数据采样时间不少于30 s，结果取等效连续声级。

7.14 电气性能

7.14.1 绝缘电阻

使用兆欧表进行测量。

7.14.2 耐电压

直流端动力端子与外壳、直流端动力端子与信号端子之间，应能承受表9所规定的直流电压，持续1 min，应无击穿闪络，漏电流不应大于20 mA。

表 9 电压限值

功率/kW	试验电压/V
60~125	1000
125~250	1500
250~500	2000

7.15 超速

保持1.1倍额定工作转速，时间不小于2 min。

7.16 环境适应性

环境适应性应按GB/T 42284.4的规定执行。

8 检验规则

8.1 检验分类

检验应分为出厂检验和型式检验。

8.2 检验项目

检验项目应符合表1的规定。

表 10 检验项目

序号	项目	出厂检验	型式检验
1	外观	√	√
2	功率密度	√	√
3	转矩密度	√	√
4	效率	√	√
5	平均无故障时间	—	√

序号	项目	出厂检验	型式检验
6	温升幅度	—	√
7	振动	√	√
8	防护等级	—	√
9	耐腐蚀性	—	√
10	耐机械冲击	√	√
11	电磁干扰性	—	√
12	噪声	√	√
13	电气性能	—	√
14	转速	—	√
15	环境适应性	—	√
注：“√”为检验项目，“—”为非检验项目。			

8.3 出厂检验

每台产品均应进行出厂检验，检验项目应符合表1的规定。

8.4 型式检验

型式检验项目应符合表1的规定，在下列情况之一时，应进行型式检验：

- a) 新产品定型或老产品转厂生产时；
- b) 设计、工艺、材料发生重大变更时；
- c) 正常生产每满 2 年；
- d) 产品停产 1 年以上恢复生产时。

8.5 组批

同一原材料，相同工艺的数量不少于50台的设备应作为一检验批。

8.6 抽样

抽样应按GB/T 2828.1的规定执行。

8.7 判定规则

所有样品检验项目合格则判定为合格；若检验项目不合格，允许加倍抽样复检，复检合格则判定为合格，否则判定为不合格。

9 标志、包装、运输和贮存

9.1 标志

每台电动机应在明显位置固定铭牌，内容至少包括：

- a) 制造商名称或商标；
- b) 产品型号及名称；
- c) 额定电压、额定功率、额定转速；
- d) 防护等级（IP 代码）；
- e) 生产日期及编号；
- f) 执行标准编号。

9.2 包装

9.2.1 包装要求

电动机应采用防潮、防震包装，内部填充缓冲材料。

9.2.2 随行文件

每台电动机应随附以下文件：

- a) 产品合格证;
- b) 使用说明书;
- c) 装箱清单。

9.3 运输

运输过程中应避免剧烈震动、雨淋及化学腐蚀性介质侵蚀。

9.4 贮存

电动机应贮存在干燥、通风、无腐蚀性介质的库房内,环境温度 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 50\text{ }^{\circ}\text{C}$,湿度不应大于85%RH。贮存期超过12个月时,应重新进行检验。
