

电机绝缘系统电场仿真分析技术规范

Specification for electric field simulation analysis of motor insulation
systems

2024 - 06 - 12 发布

2024 - 09 - 10 实施

目 次

前言 II

1 范围 1

2 规范性引用文件 1

3 术语和定义 1

4 仿真分析基本原则与流程 2

 4.1 仿真分析基本原则.....2

 4.2 仿真分析流程 2

5 绕组瞬态电压仿真分析 2

 5.1 分布参数计算 2

 5.2 绕组等效电路模型搭建 4

 5.3 边界条件加载 5

 5.4 电压分布分析 5

 5.5 结果评估 5

 5.6 结果输出 6

6 绝缘结构电场仿真分析 6

 6.1 几何模型构建 6

 6.2 有限元网格剖分 7

 6.3 材料性能设置 7

 6.4 边界条件加载 8

 6.5 电场分析 8

 6.6 结果评估 8

 6.7 结果输出 8

7 报告编写 8

附录 A（资料性） 电机绝缘系统电场仿真分析基本原理与流程 9

附录 B（资料性） 某硅钢片 B-H 特性数据表 10

附录 C（资料性） 电机绝缘系统电场仿真分析报告格式 11

图 1 绕组等效电路模型示意图.....5

图 2 匝间绝缘电场分析几何模型示意图..... 6

图 3 槽口绝缘电场分析几何模型示意图..... 7

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。

本文件由山西省工业和信息化厅提出、组织实施和监督检查。

山西省市场监督管理局对标准的组织实施情况进行监督检查。

本文件由山西省装备制造业标准化技术委员会（SXS/TC07）归口。

本文件起草单位：中车永济电机有限公司、西安交通大学、太原理工大学、中车大同电力机车有限公司、山西电机制造有限公司、永济通用电机制造有限责任公司。

本文件主要起草人：李丹、刘冠芳、黄晓云、刘学忠、白崑儒、高生岚、李思思、景刚、杨杰、樊洁心、吴有龙、郭大鹏。

电机绝缘系统电场仿真分析技术规范

1 范围

本文件规定了电机绝缘系统电场仿真分析的基本原则与流程、绕组瞬态电压仿真分析、绝缘结构电场仿真分析及报告编写。

本文件适用于变频电机成型绕组绝缘系统的电场仿真分析，其他类型电机可参考应用。

本文件不适用于具有防晕结构的高压电机、散嵌绕组电机绝缘系统的电场仿真分析。

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 3100 国际单位制及其应用

GB/T 3102.5 电学和磁学的量和单位

GB/T 17948.4 旋转电机 绝缘结构功能性评定 成型绕组试验规程 电压耐久性评定

GB/T 22720.2—2019 旋转电机 电压型变频器供电的旋转电机耐局部放电电气绝缘结构（II型）的鉴定试验

GB/T 31054 机械产品计算机辅助工程 有限元数值计算 术语

GB/T 41635—2022 高海拔电气设备电场分布有限元计算导则

3 术语和定义

GB/T 31054、GB/T 17948.4界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

3.1

电机绝缘系统 motor insulation system

电机中用于隔离导电部位的一种或多种电气绝缘材料的绝缘组合。

3.2

等效铜损电阻 equivalent copper loss resistance

电机在空载或低功率运行中产生的铜耗所等效的电阻。

3.3

等效铁损电阻 equivalent iron loss resistance

电机在空载或低功率运行中产生的铁耗所等效的电阻。

3.4

材料性能 material property

电机绝缘系统所用材料的电磁学等性能参数，如介电常数、电导率等。

[来源：GB/T 31054—2014，2.2.8，有修改]

3.5

分布电容 distributed capacitance

由两个相互绝缘的导体而产生的电容。

3.6

分布电感 distributed inductance

由于线圈绕制及在铁心中的分布而存在的电感。

3.7

匝间绝缘 interturn insulation

用以隔离线圈/线棒中导体线匝间的电气绝缘。

[来源：GB/T 17948.4—2016, 3.3]

3.8

主绝缘 mainwall insulation

主要的电气绝缘，用以隔离电机绕组中导体和接地定子/转子铁心。

[来源：GB/T 17948.4—2016, 3.1，有修改]

4 仿真分析基本原则与流程

4.1 基本原则

电机空载或低功率运行时，电机绕组高频下的感抗较大，绕组电流较小，在上升沿与下降沿脉冲波的冲击下，电压分布更不均匀；电机全功率运行时，电机绕组感抗较小，电机绕组电流较大，电压分布相比空载或低功率下相对均匀。因此绕组瞬态电压仿真分析时，考虑更为严酷的空载或低功率状态。

4.2 分析流程

电机绝缘系统电场仿真分析分为绕组瞬态电压仿真分析和绝缘结构电场仿真分析，具体内容如下：

- a) 绕组瞬态电压仿真分析通过计算等效电阻、分布电容、分布电感参数，搭建等效电路模型，分析绕组内部匝间、对地、相间和层间电压分布。
- b) 绝缘结构电场仿真分析通过建立绝缘结构三维有限元模型，以绕组匝间、对地、相间和层间最高电压波形为电场分析的边界条件，计算绝缘结构和空气中的最大电场，判断电机绝缘结构场强是否满足要求。

电机绝缘系统电场仿真分析流程见附录A。

5 绕组瞬态电压仿真分析

5.1 分布参数计算

5.1.1 等效电阻

5.1.1.1 等效铜损电阻

等效铜损电阻通过有限元分析方法和解析法计算。其中，解析法见公式（1）。

$$R_c \uparrow \frac{L_d}{\dots\dots\dots} \quad (1)$$

式中：

R_c —绕组导体电阻，单位为欧姆（Ω）；
 L_d —导体长度，单位为米（m）；
 α —导体截面周长，单位为米（m）；
 δ —集肤深度，单位为米（m）；
 σ —铜的电导率，单位为西门子每米（S/m）。
 集肤深度用公式（2）表示。

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu_0 \sigma}} \quad (2)$$

式中：
 f —频率，单位为赫兹（Hz）；
 μ_0 —真空磁导率，单位为亨每米（H/m），值为 $4\pi \times 10^{-7}$ ；
 μ_r —导体的相对磁导率；
 σ —导体的电导率，单位为西门子每米（S/m）。

5.1.1.2 等效铁损电阻

等效铁损电阻通过公式（3）得出。

$$R_e = \frac{X_m^2}{R_m} \quad (3)$$

式中：
 R_e —励磁支路为并联时的单相铁损电阻，单位为欧姆（Ω）；
 R_m —励磁支路为串联时的单相铁损电阻，单位为欧姆（Ω）；
 X_m —励磁支路为串联时的单相励磁电抗，单位为欧姆（Ω）。
 其中 R_e 通过空载损耗与空载电流求出，由公式（4）计算得出； X_m 由公式（5）和公式（6）计算得出。

$$R_m = \frac{P_0}{3I_0^2} \quad (4)$$

式中：
 P_0 —电机空载损耗，单位为瓦（W）；
 I_0 —电机空载电流，单位为安（A）。

$$Z_m = \frac{U_0}{I_0} \quad (5)$$

$$X_m = \sqrt{Z_m^2 - R_m^2} \quad (6)$$

式中：
 Z_m —励磁支路为串联时的单相励磁阻抗，单位为欧姆（Ω）；
 U_0 —电机空载电压，单位为伏（V）。

5.1.2 分布电容

分布电容包括匝间电容和对地电容，通过有限元分析与解析法计算，对于复杂的绝缘结构推荐使用有限元分析方法，按照6.1中a)建模。电容的解析法见公式（7）。

$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r A}{d} \quad (7)$$

式中：

C —电容, 单位为法拉 (F) ;

ϵ_r —绝缘的相对介电常数;

A —极板面积, 单位为平方米 (m^2) ;

ϵ_0 —真空介电常数, 单位为法每米 (F/m) , 值为 8.85×10^{-12} ;

d —极板间距离, 单位为米 (m) 。

5.1.3 分布电感

分布电感包括铁心槽部线圈分布电感与端部线圈分布电感。

铁心线圈分布电感采用有限元分析方法, 计算高频下的电感, 建立包括绕组、绝缘、铁心等三维或二维几何模型, 以额定电流作为载荷, 铁心材料性能设置为不同频率下的B-H曲线, 其他材料性能使用软件材料库中数据, 计算单匝线圈的自感, 匝间互感用公式 (8) 表示, 铁心线圈分布电感等于线圈自感与匝间互感之和。附录B列出了某一种规格硅钢片的不同频率下的B-H值, 可供参考。

$$M = k \sqrt{L_a \cdot L_b} \quad \dots\dots\dots (8)$$

式中:

M —两导体间的互感, 单位为亨 (H) ;

k —互感系数, 一般取0.8~0.9;

L_a —导体a的自感, 单位为亨 (H) ;

L_b —导体b的自感, 单位为亨 (H) 。

端部线圈分布电感应高频下计算, 建立包括绕组、绝缘、空气等三维或二维几何模型, 以额定电流作为载荷, 计算单匝线圈的自感, 端部线圈分布电感等于自感与匝间互感之和。

5.2 绕组等效电路模型搭建

5.2.1 模型简化

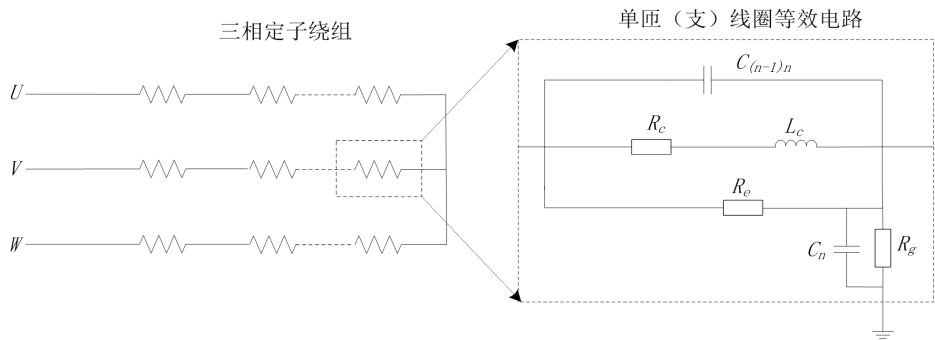
绕组模型宜以匝为单位, 建立完整的绕组等效电路模型, 如图1所示。当线圈总匝数 ≥ 960 匝时, 应对模型进行适当简化:

- a) 当并联支路为 1 支时, 绕组首支线圈以匝为单位建模, 其余绕组以线圈为单位建模;
- b) 当并联支路等于或大于 2 时, 应取并联支路的其中 1 支建模。

5.2.2 模型搭建

绕组等效电路模型要求如下:

- a) 建立三相电路模型;
- b) 铁心接地;
- c) 进行等效电阻、分布电容和分布电感计算;
- d) 绝缘对地电阻推荐不小于电机绝缘电阻值。



说明：

L_c —单匝（支）线圈电感；

R_c —高频下单匝（支）等效铜损电阻；

R_e —空载单匝（支）等效铁损电阻；

C_n —单匝（支）对地电容；

$C_{(n-1)n}$ —两匝匝间电容；

R_g —单匝（支）绝缘对地电阻。

图 1 绕组等效电路模型示意图

5.3 边界条件加载

以电机端PWM（脉宽调制）控制的三相脉冲电压波形作为边界条件加载，电压波形按照GB/T 22720.2—2019中的图1执行。若计算瞬态、雷电、操作等冲击过电压时，应以实际冲击全波电压波形作为边界条件加载。

5.4 电压分布分析

- 5.4.1 三相电路中首支线圈的各匝分别设置电压表。
- 5.4.2 三相电路中每支线圈对地电压设置电压表。
- 5.4.3 三相电路中的相间线圈设置电压表。
- 5.4.4 计算步长应不大于电压上升沿时间的 1/10。
- 5.4.5 计算时间应不少于 2 个基波周期。

5.5 结果评估

5.5.1 评估方法

5.5.1.1 表象评估法

- 通过结果表象进行定性评估，具体原则如下：
- a) 提取线圈对地电压、匝间和相间电压波形，确认电压波形的收敛性；
 - b) 分析最大电压位置的合理性；
 - c) 分析电压幅值大小的合理性。

5.5.1.2 数值评估法

多次试算调整电路模型的边界条件和分布参数，数值评估分析电路模型的可靠性。

5.5.1.3 物理样机法

进行物理样机试验，对比电压分布计算和试验结果，若仿真分析得到的数据趋势与实测结果一致，且误差在预定范围内，则认为仿真分析结果可信。

5.5.2 方法的选择

应采用表象和数值两种评估方法对分析结果进行评价，必要时，采用物理样机法进行评估。评估后，分析结果与预计结果误差不在预定范围内，对电路模型、分布参数及边界条件进行检查修正，并重新计算和评估，直到结果满足评估要求。

5.6 结果输出

绕组瞬态电压分析的结果提取和输出包括但不限于以下信息：

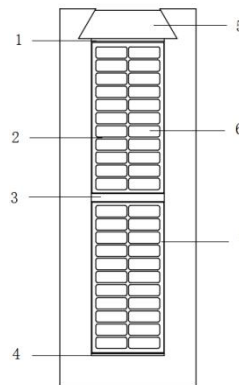
- a) 三相绕组首支线圈的各匝瞬态电压波形及最高峰值电压；
- b) 三相绕组线圈对地瞬态电压波形及最高峰值电压；
- c) 三相绕组线圈相间瞬态电压波形及最高峰值电压。

6 绝缘结构电场仿真分析

6.1 几何模型构建

电机绝缘结构电场仿真分析几何模型应符合GB/T 41635—2022中7.1规定。不同部位的电场分析模型应满足以下要求：

- a) 匝间绝缘电场仿真分析几何模型如图 2 所示，采用二维几何模型，模型中应保留与匝间电场分布相关的重要特征，如电磁线倒角、匝间垫条等。

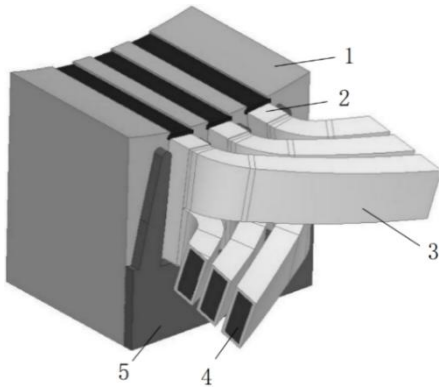


标引序号说明：

- 1—楔下垫条；
- 2—匝间绝缘；
- 3—层间绝缘；
- 4—槽底垫条；
- 5—槽楔；
- 6—导体；
- 7—主绝缘。

图 2 匝间绝缘电场分析几何模型示意图

- b) 槽口绝缘电场仿真分析几何模型如图 3 所示，采用三维几何模型，将主绝缘建成一体结构；模型中应保留与槽口绝缘电场分布相关的重要特征，如槽形、倒角尺寸等。模型简化宜将单支线圈多匝导体结构简化为单根导体结构，且至少保证 3 个相邻槽的线圈结构。



标引序号说明：

- 1—铁心；
- 2—槽绝缘；
- 3—主绝缘；
- 4—导体；
- 5—齿压板。

图 3 槽口绝缘电场分析几何模型示意图

- c) 绕组端部电场仿真分析可根据需求采用二维或三维几何模型，模型应包括主绝缘、导体和空气。
- d) 相间电场仿真分析可根据需求采用二维或三维几何模型，模型应包括铁心、主绝缘、空气、层间绝缘、槽楔等。
- e) 槽内绝缘层间仿真电场分布采用二维几何模型，根据绝缘层的厚度进行等比例建模。

注：绕组端部电场与相间电场可单独分析，也可与槽口绝缘电场合并分析。

6.2 有限元网格剖分

6.2.1 网格剖分

按照GB/T 41635—2022中7.4的规定剖分，对不同的部位采用对应的剖分方法，具体要求如下：

- a) 对于等电位分布的导体、接地铁芯等对电场分布影响较小部件可采用低阶单元进行剖分；
- b) 对于电场集中的部位应加密处理，该部位尺寸大于 1mm 时，网格层数最少为 2 层，可采取高阶单元剖分提高计算精度。

6.2.2 网格质量检查

提取有限元网格剖分模型，对网格应进行质量检查，检查要求如下：

- a) 确认小尺寸（如绝缘层）、电场集中部件（如槽口部位）及接触面位置无畸变网格；
- b) 次要结构部件网格质量要求可适当降低，确认无畸变网格。

6.3 材料性能设置

材料性能的单位应和有限元模型单位保持一致，应符合GB 3100、GB/T 3102.5的要求。若计算高温、高频下的电场分布，应输入该工况下对应的材料性能参数。

6.4 边界条件加载

6.4.1 静电场分析时，应加载线圈最大电压值，接地点设为零电位。

6.4.2 瞬态电场分析时，应加载最大脉冲电压波形，接地点设为零电位。

6.5 电场分析

6.5.1 静电场结果分析按照 GB/T 41635-2022 中 7.6.1 执行。

6.5.2 瞬态电场结果分析按照 GB/T 41635-2022 中 7.6.2 执行。

6.6 结果评估

按照GB/T 41635—2022中第11章中的规定对计算结果的偏差进行评估。

6.7 结果输出

绝缘结构电场分析结果的提取和输出包含但不限于以下信息：

- a) 显示或输出绝缘结构和空气中最大电场幅值及波形；
- b) 显示或输出绝缘结构和空气中最大电场位置。

7 报告编写

报告编写可参考附录C，报告内容包含但不限于以下内容：

- a) 电机参数：绕组连接方式、绕组线圈数、并联支路数、线匝数等；
- b) 电路模型及有限元模型（如有特殊工况需要加以说明）；
- c) 分布参数计算：分布电容、分布电感和等效电阻；
- d) 材料性能参数：相对介电常数、体积电导率等；
- e) 边界条件；
- f) 仿真分析结果；
- g) 结果分析。

附录 A
(资料性)

电机绝缘系统电场仿真分析流程

电机绝缘系统电场仿真分析流程见图A. 1。

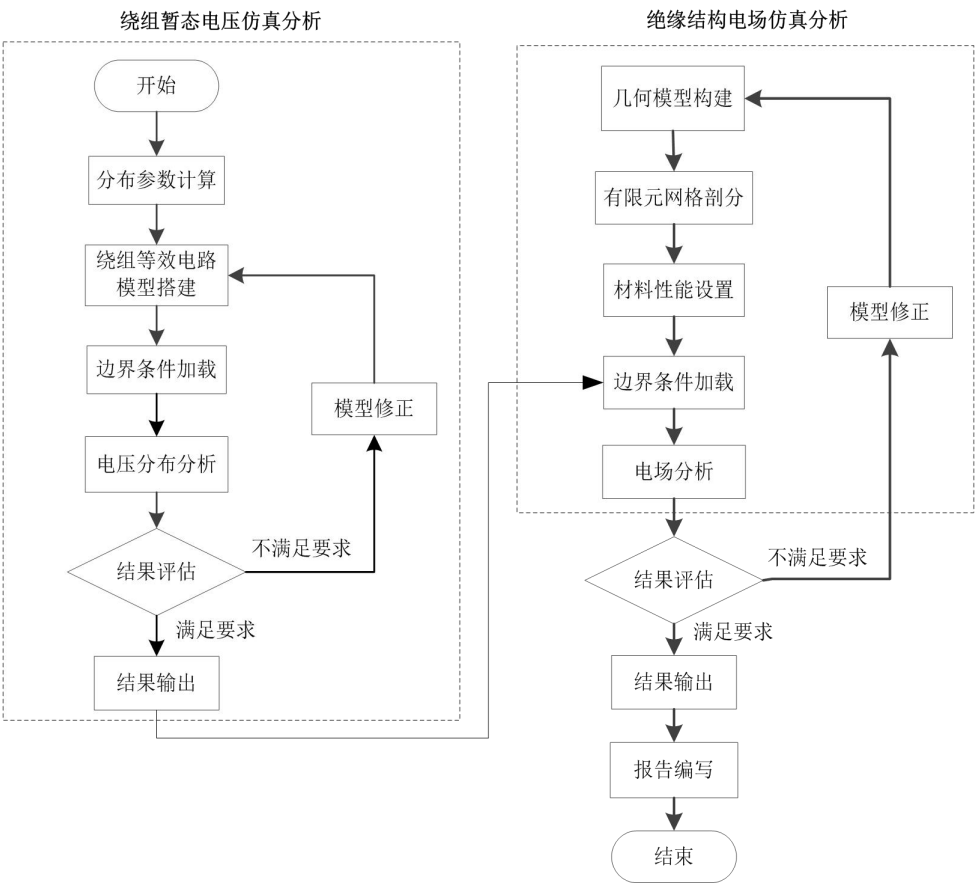


图 A. 1 电机绝缘系统电场仿真分析流程

附 录 B
(资料性)
某硅钢片 B-H 特性数据表

某硅钢片B-H特性见表B. 1。

表 B. 1 硅钢片 B-H 特性数据表

H(A/m)	B (50Hz)	B (60Hz)	B (100Hz)	B (200Hz)	B (400Hz)	B (700Hz)
10	0.014	0.014	0.014	0.013	0.012	0.01
20	0.033	0.033	0.032	0.03	0.027	0.023
30	0.059	0.059	0.056	0.051	0.045	0.038
40	0.094	0.093	0.090	0.08	0.067	0.054
50	0.149	0.148	0.137	0.115	0.094	0.073
60	0.241	0.234	0.208	0.165	0.126	0.094
70	0.357	0.337	0.295	0.223	0.164	0.12
80	0.479	0.454	0.388	0.287	0.205	0.149
90	0.603	0.573	0.48	0.355	0.25	0.178
100	0.721	0.681	0.571	0.418	0.295	0.21
125	0.94	0.928	0.779	0.565	0.397	0.29
150	1.085	1.076	0.959	0.696	0.491	0.36
175	1.163	1.159	1.109	0.814	0.575	0.422
200	1.214	1.212	1.198	0.922	0.651	0.483
250	1.286	1.284	1.278	1.112	0.784	0.586
350	1.364	1.362	1.358	1.348	1.007	0.754
500	1.424	1.421	1.420	1.418	1.245	0.954
750	1.474	1.473	1.472	1.472	1.461	1.19
1000	1.505	1.505	1.504	1.504	1.502	1.346
1500	1.548	1.549	1.548	1.548	1.544	1.492
2000	1.580	1.58	1.579	1.579	1.575	1.525
2500	1.605	1.605	1.604	1.604	1.602	1.551
5000	1.692	1.692	1.691	1.690	1.689	1.642
7500	1.753	1.753	1.751	1.751		
10000	1.8	1.801	1.799			

附 录 C
(资料性)
电机绝缘系统电场仿真分析报告模板

C.1 电机参数

电机参数至少应包含：绕组连线方式、绕组线圈数、并联支路数和线匝数。

C.2 绕组瞬态电压分布仿真分析

C.2.1 分布参数计算

C.2.1.1 等效电阻

给出等效电阻的计算过程与结果。

C.2.1.2 分布电容

给出分布电容的计算模型（解析公式）、匝间电容与对地电容值。

C.2.1.3 分布电感

给出分布电感的计算模型（解析公式）、匝间或线圈间的电感系数值。

C.2.2 绕组等效电路模型

C.2.3 边界条件加载

给出三相激励的输入波形，同时明确该波形的上升沿时间、峰值电压、稳定幅值电压、中间直流母线电压及变频器的接地方式等对边界条件有影响的特征参数。

C.2.4 计算结果

匝间电压波形，明确匝间峰值电压，最大匝间电压位置。
线圈对地电压波形，明确线圈对地峰值电压与最大峰值电压线圈位置。
相间最大电压波形，明确相间最大位置的两支线圈。

C.3 绝缘结构电场仿真分析

C.3.1 几何模型

明确电机绝缘结构尺寸与绝缘结构类型。

C.3.2 网络剖分

网格剖分模型，网格数量。

C.3.3 材料性能

列举所涉及到的所有材料性能参数。

C.3.4 边界条件加载

明确边界条件。

C.3.5 仿真分析结果

提取绝缘结构与空气中最大电场幅值与波形，明确最大电场位置。

C.4 结果分析

给出该结构下的电压分布结果与绝缘电场值：包括电压分布波形、电场分布波形、电场云图及最大值位置说明。
