

团 体 标 准

T/CMIF XXXX—20XX

电机远程运维 第 2 部分：故障诊断模型要求

Remote operation and maintenance of motor system—Part 2: Requirements for fault diagnosis model

（征求意见稿）

（本稿完成时间：2023 年 6 月 12 日）

在提交反馈意见时，请将您知道的相关专利连同支持性文件一并附上。

20XX – XX – XX 发布

20XX – XX – XX 实施

中国机械工业联合会 发 布

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这些专利的责任。

本文件由中国机械工业联合会提出并归口。

本文件起草单位：

本文件主要起草人：

本文件为首次发布。

引 言

截止去年，电机的总产量已高达到24865.9万千瓦，这些电机设备主要使用在全国各个行业中，但因其型号复杂，故障类型繁多，分析困难，工作人员的经验不足，知识面有限等问题，故障的发现、诊断和处理往往受到延误，严重地影响了企业的工作进度和经济效益，甚至可能造成重大的安全事故。

本文件将工业互联网新型信息技术与传统电机制造业相结合，集成规范机理模型知识与智能诊断方法，给出了在电机工业互联网平台上实现该功能的指导，实现了在线监测采集和电机特征参数预处理。本文件列出了常用的故障特征与故障模式，给出故障诊断模型建设的基本方法。电机终端用户能获取准确的故障告警与有效的诊断信息，体现了远程运维的核心价值。

本文件助力实现电机的远程故障诊断，判断异常状态，定位故障部位，提供更加快速，准确，高效的专业化诊断服务，延长电机服役期限和使用寿命，减低设备全生命周期的投资费用。切实发挥标准化和质量工作对企业及装备制造业的引领和支撑作用，推进电机产业数字化、智能化发展。

电机远程运维

第 2 部分：故障诊断模型要求

1 范围

本文件规定了电机行业工业互联网平台远程运维故障诊断模型的一般要求、总体结构、故障特征、故障模式和故障模式隶属度等要求。

本文件适用于接入远程运维系统并网运行的工业用电机的故障诊断，其他类型电动机的远程运维系统参照执行。

2 规范性引用文件

本文件没有规范性引用文件。

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

故障特征 *fault feature*

处于某种故障模式时，能够产生相应变化的特征参数。

3.2

故障模式 *fault mode*

对电机所发生的、能被观察或测量到的故障现象的规范性描述。

3.3

故障诊断 *fault diagnosis*

通过故障特征判断电机所发生的、能被观察或测量到的故障现象的过程。

3.4

机理模型 *mechanism model*

基于已知的物理、化学、生物学等原理，通过数学推导和实验验证，建立起来的精确数学模型。

4 一般要求

4.1 故障诊断模型应以电机的电机输入电压、电流、轴承及电机振动信号、转速、噪声和电机主要部件温度以及环境温度等数据作为输入信号进行故障诊断。

4.2 故障诊断模型应满足将电机的运行状态分为正常，可疑、不良和危险四种状态的需求。

4.3 采用阈值比较的故障诊断，阈值应提供智能预警阈值、普通预警阈值和紧急报警阈值，一般要求见表 1。

表1 阈值的一般要求

限值范围	状态	保护决策值	触发动作
$x < \text{智能预警阈值}$	正常	1	无
$\text{智能预警阈值} \leq x < \text{普通预警阈值}$	可疑	1	智能预警、1 周内安排检修。
$\text{普通预警阈值} \leq x < \text{紧急报警阈值}$	不良	1	普通预警、1 天内安排检修、降电流运行。
$x \geq \text{紧急报警阈值}$	危险	0	保护、紧急报警

4.4 基于机理模型的方法

- 4.4.1 基于机理模型的方法需要被诊断系统精确的机理模型，利用机理模型计算得到输出值，输出值与系统给定的阈值比较，得到故障诊断结论。
- 4.4.2 基于机理模型的方法可根据可观察的数据来辨识系统的动态参数，依据系统参数与模型参数的差值来判断系统是否出现故障。
- 4.4.3 基于机理模型的方法可通过对系统状态进行重构，通过长期观察机理模型输出值的序列，采用统计的方法对输出值序列分析，达到故障检测的目的。
- 4.5 故障诊断模型可通过相关的经验，基于神经网络和模糊逻辑等方法，建立系统定性模型，来解决复杂的故障诊断问题。
- 4.6 故障诊断模型可采用数据模型，通过采集系统的输入数据，通过统计学方法，分析数据的统计特征，建立过程数据特征模型，如小波分析和神经网络主成分分析等
- 4.7 故障诊断模型的分析结果应满足电机系统维护和维修对故障分析的细化程度。
- 4.8 故障诊断模型应覆盖电机的运行环境故障、电机本体故障、电机安装故障和检测的参数超限四个方面。
- 4.9 对电机本体故障分析模型的分析结果至少应能区分到电机定子、转子、轴承和通风等部件。

5 总体结构

5.1 电机工业互联网平台的故障诊断系统结构主要由设备侧、边缘侧、云平台和应用层等部分组成。典型结构见下图 1。

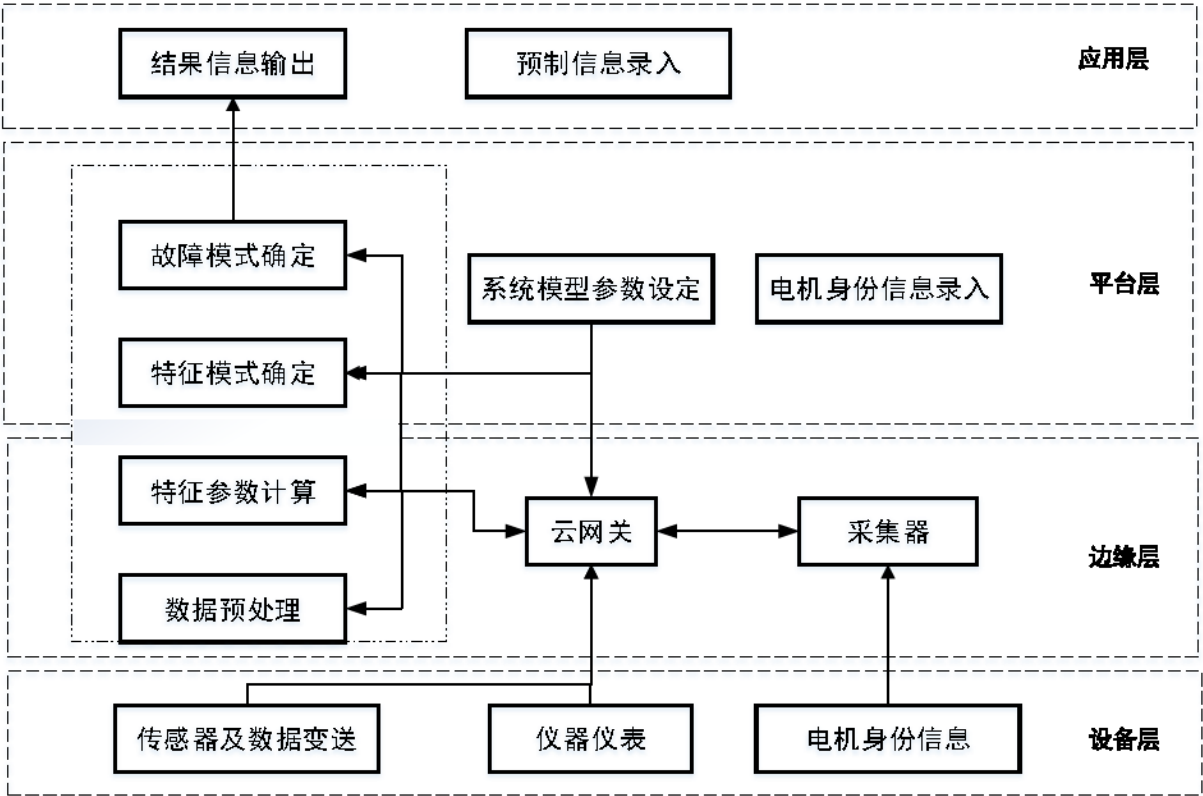


图1 电机工业互联网平台故障诊断系统结构示意图

- 5.2 平台的故障诊断包括数据预处理、特征参数计算、故障特征确定和故障模式确定等功能模块。
- 5.3 数据预处理是将可采集的数据通过机理模型计算得到故障特征需要的参数。
- 5.4 故障特征确定可系统根据特征参数的值，预先给定的故障阈值参数确定电机各个特征参数处于故障特征的隶属度，故障特征确定可以根据用户需求用数据或图表在平台显示。
- 5.5 故障模式确定可根据各个故障模式和各个故障特征的关系，综合确定各个故障模式隶属度，

- 5.6 故障特征隶属度和故障模式隶属度的输出，是云平台根据用户需求用数据或图表显示故障特征隶属度和故障模式隶属度。
- 5.7 系统模型参数设定是云平台根据机理模型和数据分析成果，给出预处理模型参数、特征参数的计算模型参数、故障特征及其阈值参数、故障模式和故障特征的关系模型等。
- 5.8 云网关负责边缘侧和云平台的通讯，把云平台需要的边缘侧的特征参数和边缘侧计算结果上传到平台，接收云平台下发的阈值参数等相关参数。
- 5.9 平台层包括系统模型参数设定、电机身份信息录入，相关的故障分析和故障模型的计算等。
- 5.10 应用层包括预置信息录入、故障特征隶属度和故障模式隶属度的输出等功能。

6 故障特征

- 6.1 电机的故障特征信号包含电压、电流、振动、温度、轴电压、噪声、转速和环境等远程运维系统检测的信号，和某个标准进行比较后，得到符合某个特征的信号。
- 6.2 电机故障特征信号包含远程运维系统检测的信号经过机理模型运算得到的数据和某个标准进行比较后，得到符合某个特征的信号。
- 6.3 电机故障特征信号可包含远程运维系统检测的信号和机理模型运算得到的数据，经通过统计学方法，分析数据的统计特征后得到的数据和某个标准进行比较后，得到符合某个特征的信号。
- 6.4 根据电机在线监测可采集的电机运行参数和常见机理模型计算参数，电机故障诊断常见的故障特征见表 2。

表2 电机常见故障特征

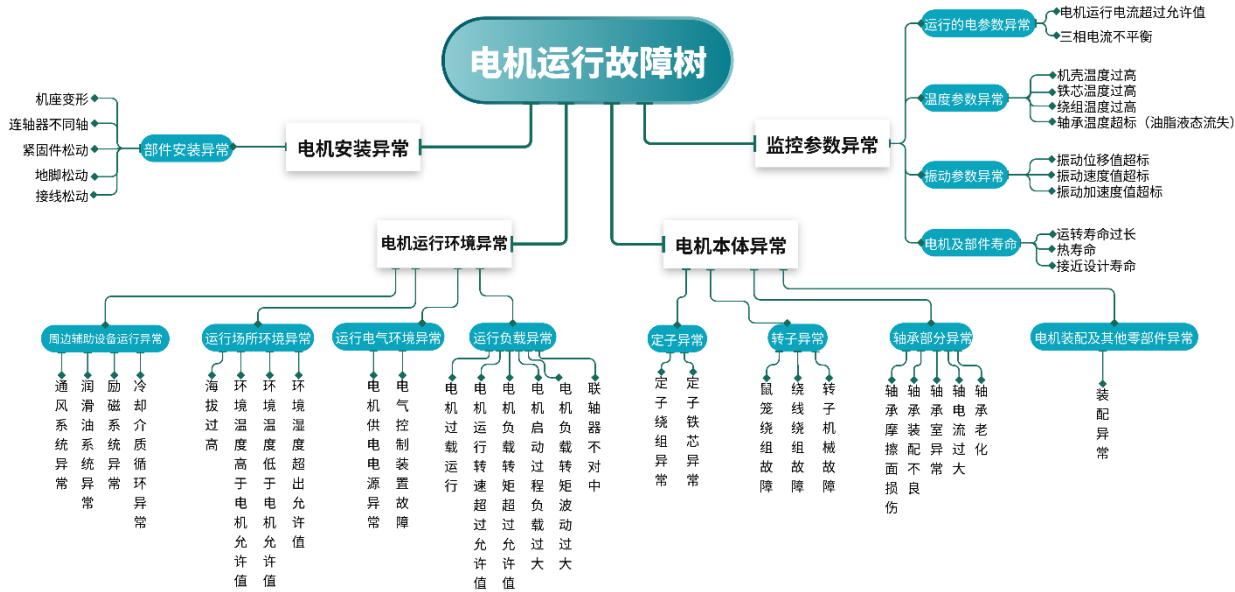
序号	故障特征	序号	故障特征
1	各个电压有效值过大	19	电流的谐波含量过大
2	各个电压有效值过小	20	电流频谱中某个频率的幅值过大
3	各个电压有效值为零	21	振动速度的有效值过大
4	各个电压的频率过大	22	振动频谱中某个频率的幅值过大
5	各个电压的频率过小	23	各点温度/温升过大
6	电压的不平衡度过大	24	绝缘系统热寿命时间过大
7	电压的负序与正序之比过大	25	轴承运转寿命时间过大
8	电压谐波含量过大	26	轴承润滑油更新后运行时间过大
9	电压频谱中某个频率的幅值过大	27	累计运行时间过大
10	电流有效值过大	28	给定周期的温度变化率过大
11	电流有效值过小	29	给定周期的振动变化率过大
12	1个电流有效值为零	30	转速过大
13	电流频率过大	31	有功功率过大
14	电流频率过小	32	功率因数过小
15	电流有效值与峰峰值之比过大	33	效率过小
16	电流的不平衡度过大	34	2个电流有效值为零
17	电流的负序与正序之比过大	35	3个电流有效值为零
18	电流的零序与正序之比过大		

- 6.5 电机故障特征信号可根据电机类型及参数以及建立电机运维系统的目标，适当的增加和减少。

7 故障模式

- 7.1 电机的故障模式应包含运维系统监控参数异常故障，实现电机远程巡检功能
- 7.2 电机的故障模式按照其发生的部位宜分为不同的层级：第一层级是电机系统的主要环节；第二层级是主要部件的组件；第三层级是具体的故障模式。
- 7.3 电机系统故障模式的第一层次宜分为：电机的运行环境、电机本体和电机安装异常等
- 7.4 电机运行环境应按不同的运行环境类型宜分为：运行场所环境、周边设备环境、运行的电气环境和运行的负载环境等方面。
- 7.5 电机本体应按电机的结构并结合维护保养的要求宜分为：定子、转子、轴承和装配等方面。
- 7.6 电机的安装异常宜分为：电机安装和负载安装。

7.7 电机系统故障模式分级树状结构见图 2。



7.8 电机系统常见故障模式分级结构见表 3。

表3 电机系统常见故障模式分级结构

一级故障	二级故障	三级故障	四级故障
电机运行环境异常	运行场所环境异常	海拔过高	
		环境温度高于电机允许值	
		环境温度低于电机允许值	
		环境湿度超出允许值	
	周边辅助设备运行异常	冷却介质循环异常	
		润滑油系统异常	
		通风系统异常	风路堵塞
			风叶碰挡板
			风罩损坏
			风扇叶片松动
			风扇叶片损坏
		励磁系统异常	
	运行电气环境异常	电机供电电源异常	电压高于电机允许值
			电压低于电机允许值
			供电频率超出电机允许最大值
			供电频率低于电机允许最小值
			供电电压谐波电压因数（HVF）超标
			供电电压负序分量超标
			供电电压零序分量超标
			供电电压不平衡度超标
		电气控制装置故障	供电缺1相
			供电缺2相
			电机起动未完成
			电机接线松动
			供电共模电压超标
			软启动部分异常

一级故障	二级故障	三级故障	四级故障
	运行负载异常		供电频率使电机整机产生共振
		电机过载运行	
		电机负载转矩超过允许值	
		电机运行转速超过允许值	
		联轴器不对中	
		电机负载转矩波动过大	
		电机启动过程负载过大	
电机本体异常	定子异常	定子绕组异常	电机接地故障
			定子绕组断路
			匝间短路故障
			相间短路故障
			绕组对地绝缘老化
			绕组绝缘局放超标
		定子铁芯异常	定子片间绝缘破坏
			电机接地不正常
			定子铁芯过热故障
			定子铁芯多点接地
			定子铁芯压装故障
	转子异常	鼠笼绕组故障	鼠笼条断裂
			端环断裂
		绕线绕组故障	转子绕组三相不平衡
			转子绕组匝间短路
			转子电阻未切除
			电刷和集电环接触不良
			转子绕组多点接地
			起动电阻不平衡
		转子机械故障	转子轴弯曲
			转子不平衡
			转子轴裂纹
			铁芯压装故障（压装不紧）
			定转子气隙静态偏心
			定转子气隙动态偏心
			转轴温度过高（造成油脂液化）
			转子铁芯与轴松动
	轴承部分异常	轴承摩擦面损伤	轴承磨损
			疲劳剥落
			烧伤
			电蚀
		轴承装配不良	保持架故障
			滚动体旋转故障
			外环故障
			内环故障
		轴承室异常	轴承与转轴配合过松（轴承走内圆）
			轴承与轴承室配合过松（轴承走外圆）
			电机轴承缺油
			电机轴承油脂过多
			电机轴承油脂失效（需更换油脂）
		轴电流过大	
		轴承老化	
	电机装配及零部件异常	装配异常	静态气隙不均匀
			动态气隙不均匀
			轴向窜动（定转子铁心未对齐）
			电机扫膛

一级故障	二级故障	三级故障	四级故障
监控参数异常	运行的电参数异常	电机运行电流超过允许值	
		三相电流不平衡	
	温度参数异常	机壳温度过高	
		铁芯温度过高	
		绕组温度过高	
		轴承温度超标（油脂液态流失）	
	振动参数异常	振动位移值超标	
		振动速度值超标	
		振动加速度值超标	
	电机及部件寿命	运转寿命过长	
		热寿命	
		接近设计寿命	
电机安装异常	电机安装异常	机座变形	
		地脚松动	
		紧固件松动	
		连轴器不同轴	
		接线松动	

7.9 电机系统故障模式可根据电机类型及参数以及建立电机运维系统的目标，适当的增加和减少，但故障模式至少分三级。

8 故障模式隶属度

8.1 一般要求

- 8.1.1 对电机故障模式的描述可采用故障模式隶属度表示电机处于该故障模式的程度。
- 8.1.2 故障模式隶属度，其值为 0—1，0 表示电机不处于该故障模式，1 表示电机处于该故障模式。
- 8.1.3 电机故障模式隶属度应按电机维护和保养要求应提供智能预警阈值、普通预警阈值和紧急报警阈值。
- 8.1.4 故障模式隶属度应根据阈值将电机的运行状态分为正常，可疑、不良和危险四种状态。
- 8.1.5 故障模式隶属度应由故障特征隶属度、故障模式和故障特征的关系融合计算得到。

8.2 故障特征隶属度

- 8.2.1 对于在线监测得到其特征参数以及通过机理模型计算或统计分析得到的故障特征，均需要计算故障特征的隶属度。
- 8.2.2 故障特征隶属度的取值范围为 0—1，0 表示不符合，1 表示符合，0-1 之间为有符合到不符合的过渡区。
- 8.2.3 故障特征隶属度应根据故障特征参数含义及实际情况，采用公式（1）-（6）进行计算。
- 8.2.4 隶属度函数中的阈值参数、模糊程度大小或过渡区域大小应根据需要进行设定。
- 8.2.5 特征值过大的隶属度指数变化的隶属度函数见式（1）。

$$u(T)=\begin{cases}0&,&T\leq T_1\\1-e^{-\frac{(T-T_1)^2}{b_1}}&,&T>T_1\end{cases}\cdots\cdots\cdots(1)$$

式中：
T——故障特征值；
T₁——阈值参数（正常范围的上限）；
b₁——设定的隶属度函数上限处模糊程度的大小。

- 8.2.6 特征值过大的隶属度线性变化的隶属度函数见式（2）。

$$u(T) = \begin{cases} 0 & , T \leq T_1 \\ \frac{T-T_1}{b_1} & , T_1 < T \leq T_1 + b_1 \\ 1 & , T > T_1 + b_1 \end{cases} \dots\dots\dots (2)$$

式中：

T——故障特征值；

T_1 ——阈值参数（正常范围的上限）；

b_1 ——设定的隶属度函数值从0—1的过渡区域大小。

8.2.7 特征值过小的隶属度指数变化的隶属度函数见式（3）。

$$u(T) = \begin{cases} 1 - e^{-\frac{(T-T_2)^2}{b_2}} & , T \leq T_2 \\ 0 & , T > T_2 \end{cases} \dots\dots\dots (3)$$

式中：

T——故障特征值；

T_2 ——阈值参数（正常范围的下限）；

b_2 ——设定的隶属度函数下限处模糊程度的大小。

8.2.8 特征值过小的隶属度线性变化的隶属度函数见式（4）。

$$u(T) = \begin{cases} 1 & , T \leq T_2 + b_2 \\ \frac{T_2-T}{b_2} & , T_2 - b_2 < T \leq T_2 \\ 0 & , T > T_2 \end{cases} \dots\dots\dots (4)$$

式中：

T——故障特征值；

T_2 ——阈值参数（正常范围的下限）；

b_2 ——设定的隶属度函数值从0—1的过渡区域大小。

8.2.9 特征值为0的隶属度指数变化的隶属度函数见式（5）。

$$u(T) = \begin{cases} 0 & , T \leq 0 \\ e^{-\frac{T^2}{b_1}} & , T > 0 \end{cases} \dots\dots\dots (5)$$

式中：

T——故障特征值；

b_1 ——设定的隶属度函数模糊程度的大小。

8.2.10 特征值为0的隶属度线性变化的隶属度函数见式（6）。

$$u(T) = \begin{cases} 1 & , T \leq 0 \\ \frac{b_1-T}{b_1} & , 0 < T \leq b_1 \\ 0 & , T > b_1 \end{cases} \dots\dots\dots (6)$$

式中：

T——故障特征值；

b_1 ——设定的隶属度函数值从0—1的过渡区域大小。

8.3 故障模式与故障特征

8.3.1 故障模式与故障特征之间存在充分条件关系和必要条件关系，在隶属度计算时应分别进行处理。

8.3.2 故障特征和某故障模式之间存在充分条件关系的条件，出现该故障特征则电机处于该故障模式。该种故障特征的出现将指向单一的故障模式。

8.3.3 故障特征和故障模式之间存在必要条件关系的条件是：电机处于该故障模式则必然出现该故障特征或者电机处于该故障模式则必然不出现该故障特征。

8.4 故障特征是故障模式的充分条件的隶属度

8.4.1 根据故障模式和故障特征的充分条件关系，可以建立故障模式与故障特征的充分条件关系表（格式见表4）。

表4 故障特征是故障模式充分条件关系表

	故障特征1	故障特征2	...	故障特征j	...	故障特征n
故障模式1	X_{11}	X_{12}	...	X_{1j}	...	X_{1n}
故障模式2	X_{21}	X_{22}	...	X_{2j}	...	X_{2n}
...
故障模式i	X_{i1}	X_{i2}	...	X_{ij}	...	X_{in}
...
故障模式M	X_{M1}	X_{M2}	...	X_{Mj}	...	X_{Mn}

8.4.2 故障模式 i 和故障特征 j 之间存在充分条件关系时填写计算得到的故障特征 j 的隶属度值；

8.4.3 故障模式 i 和故障特征 j 之间不存在充分条件关系时 X_{ij} 赋值 0。

8.4.4 对于没有监测的故障特征 j，故障特征 j 对应的所有故障模式全部赋值 0。

8.4.5 故障特征是故障模式的充分条件的隶属度按式（7）进行计算。

$$MS_{ci} = 1 - \prod_{j=1}^n (1 - X_{ij}) \dots\dots\dots (7)$$

注：对于故障模式没有任何充分条件关系的故障特征时， MS_{ci} 赋值 0

式中：

MS_{ci} ——故障模式 i 融合了所有充分条件关系后的隶属度；

X_{ij} ——故障特征是故障模式充分条件关系表中故障模式 i 相对应于故障特征 j 的数值。

8.5 故障模式与故障特征之间是必要条件关系的隶属度

8.5.1 根据故障模式和故障特征的必要条件关系，可以建立故障模式与故障特征的必要条件关系表。

表5 故障模式和故障特征必要条件关系表

	故障特征1	故障特征2	...	故障特征j	...	故障特征n
故障模式1	Y_{11}	Y_{12}	...	Y_{1j}	...	Y_{1n}
故障模式2	Y_{21}	Y_{22}	...	Y_{2j}	...	Y_{2n}
...
故障模式i	Y_{i1}	Y_{i2}	...	Y_{ij}	...	Y_{in}
...
故障模式m	Y_{m1}	Y_{m2}	...	Y_{mj}	...	Y_{mn}

8.5.2 故障模式 i 可能有出现故障特征 j，也可能不出现故障特征 j 时 Y_{ij} 赋值 1。

8.5.3 故障模式 i 必然有故障特征 j 出现时 Y_{ij} 赋值计算得到的故障特征 j 的隶属度值。

8.5.4 故障模式 i 必然不出现故障特征 j 时 Y_{ij} 赋值 1 与计算得到的故障特征 j 的隶属度值的差值。

8.5.5 对于没有监测的故障特征 j，故障特征 j 对应的所有故障模式全部赋值 1。

8.5.6 故障特征是故障模式的必要条件隶属度按公式（8）进行计算。

$$MS_{bi} = \prod_{j=1}^n (Y_{ij}) \dots\dots\dots (8)$$

注：对于故障模式没有任何必要条件关系的故障特征时， MS_{bi} 赋值 0

式中：

MS_{bi} ——故障模式 i 融合了所有必要条件关系后的隶属度；

X_{ij} ——故障特征是故障模式必要条件关系表中故障模式 i 相对应于故障特征 j 的数值。

8.6 故障模式隶属度计算

根据上述故障模式 i 融合了所有充分条件关系后的故障模式隶属度和融合了所有必要条件关系后的故障模式隶属度计算结构，按式（9）计算得到故障模的隶属度值。

$$MS_i = 1 - (1 - MS_{ci}) \times (1 - MS_{bi}) \dots\dots\dots (9)$$

- 式中：
- MS_i ——故障模式*i*的隶属度；
 - MS_{ci} ——故障模式*i*融合了所有充分条件关系后的隶属度；
 - MS_{bi} ——故障模式*i*融合了所有必要条件关系后的隶属度。
-