

汽轮机性能试验测量 不确定度评价导则



能源部西安热工研究所

能源部热力发电设备及材料质检中心

美国国家标准

ANSI/ASME
PTC6 报告—1985

汽轮机性能试验

测量不确定度评价导则

[本报告由性能试验规程第6(汽轮机)委员会提出]

宁 哲 译

安敏善 校
蒋 勇

能源部西安热工研究所

能源部热力发电设备及材料质检中心

一九九一年十月

前 言

(本前言不是 ANSI/ASME PTC6 报告——1985 的组成部分)

汽轮机性能试验规程 ANSI/ASME PTC6—1976(R1985),以下简称“规程”,提供了精确的汽轮机试验方法,以便获得不确定度最小的性能指标。该规程是以使用精密的仪器和最有效的测量方法为基础的。用试验的不确定度作为最终试验结果的允许误差,则不属于该规程的范围。这种允许误差,如果要使用的话,也主要是在商业方面,主要取决于试验双方所达成的协议。

值得注意的是,对于特定的汽轮机验收试验来说,规程上推荐的测试仪表和测量方法并非总是经济上可行的或客观上可能的。本报告将提供用以确定试验结果不确定度程度的导则。还将讨论由于违反规程所述的方法而增加的不确定度。

本报告提供了不确定度的估计值,用它可以确定出汽轮机性能试验中试验读数的可能误差。应当注意的是,本报告中所用到的统计方法不同于 ANSI/ASME PTC19.1—1985 中所使用的方法,前者较后者要简单的多。ANSI/ASME PTC19.1—1985,测量不确定度规范,包括有能使用户选择合适的 uncertainty 模式来分析和报告试验结果的有关讨论及方法。为了满足本报告的需要,委员会在 ANSI/ASME PTC19.1 中选用了一种简化了的平方和的根这种模式。与汽轮机试验有关的误差可以用 uncertainty 区间来表示,当采用简化了的平方和的根这种模式后,由 uncertainty 区间可以得出一个置信度达 95% 的试验结果的总 uncertainty。也就是说,用这种模式会得出一个关于试验值的正/负区间,它包括真实值的可能性为 95%。应当注意,测量误差通常由两部分组成——一部分是固有部分,称之为偏差或系统误差,另一部分是随机部分,称之为精度或采样误差。因为统计学是研究大量随机数据的,严格地说,也只有测量误差的随机部分才可以用统计学来分析研究。所以,正如 ANSI/ASME PTC19.1—1985 中所描述的那样,在 uncertainty 分析过程中对这两种误差应分别对待。只有在计算最终试验 uncertainty 时,在单个误差部分通过使用适当的灵敏因数传递到最终结果后,才将这些单个误差成分组合起来。

为了从汽轮机性能试验所要求的大量测量数据中搜集出可能的误差,编写委员会从对 PTC19 所发表的各种有关仪器仪表方面的文章及补充材料中采纳了这方面专家的一致意见,并搜集了大量的工业试验数据和制造商提供的数据。遗憾的是,没有关于将测量误差分解为固有部分和随机部分的详细资料。因此,第 4 章中给出的各种测量装置和测试技术的精度是用不

确定度区间来表示的,其置信度为 95%,并假定它同时包括了固有部分和随机部分。相应于这一简化的假设,第 5 章在计算最终试验结果的不确定度时,也没有区分固有误差和随机误差。相应地,正如第 5 章所述,如果对固有误差部分和随机误差部分的相对重要性没有足够的知识,则在运用统计学方法时,譬如,通过增加仪表来减小仪表误差或通过增加采样点数目来减小采样误差,应特别谨慎。

经性能试验规程第 6(汽轮机)委员会批准后,这份 ANSI/ASME PTC6 报告于 1985 年 11 月 27 日被美国国家标准局标准审查委员会批准为美国国家标准。

性能试验规程第 6(汽轮机)委员会成员名单

(略——译注)

性能试验规程委员会名单

(略——译注)

本报告叙述了用于汽轮机商业性性能试验的代用仪表和代用方法。这种试验不能满足 PTC6 的要求,故不能用于验收试验。除非试验双方就试验与 PTC6 相违背的所有方面在试验前达成书面协议。

目 录

前 言

委员会成员名单

第 0 章 绪言	(1)
第 1 章 目的和范围	(1)
第 2 章 术语的说明和定义	(2)
第 3 章 指导性原则	(2)
第 4 章 测量仪表和测量方法	(8)
第 5 章 结果的计算	(36)
图 3.1 各种测量中试验数据分散性对试验结果影响的最大推荐值	(3)
图 3.2 为使试验数据分散性引起的试验结果附加不确定度最小而要求的读数次数	(4)
图 3.3 基本系数, %	(6)
图 4.1 发电机连接型式	(9)
图 4.2 用于单相电路中等效电压和电流不平衡及 $2\frac{1}{2}$ 静子电度表三种可能的 Z 形线圈位置的误差曲线	(10)
图 4.3 电度表的连接	(11)
图 4.4 采用三功率表法测量电功率输出的典型连接图	(16)
图 4.5 因没有整流器, 而流动受干扰时的最小的上游直管段	(24)
图 4.6 孔径比 β 的影响	(25)
图 4.7 整流器后的直管段长度(直径倍数)的影响	(25)
图 4.8 整流器内管束数目的影响	(26)
图 4.9 下游直管段长度的影响	(26)

图 5.1	典型的主蒸汽压力修正曲线(汽轮机进汽为过热蒸汽)	(44)
图 5.2	典型的主蒸汽温度修正曲线(汽轮机进汽为过热蒸汽)	(44)
图 5.3	典型的排汽压力修正曲线	(45)
图 5.4	温度为常数时,过热蒸汽焓的斜率	(46)
图 5.5	压力为常数时,过热蒸汽焓的斜率	(46)
图 5.6	饱和液体焓随压力变化的斜率	(48)
图 5.7	饱和液体焓随温度变化的斜率	(48)
表 3.1	计算图 3.2 中 Z 用的影响系数 θ_1 和 θ_2	(5)
表 4.1	各种测量方法所要求的电流互感器(CT's)和电压互感器(PT's)数目及测量方法的不确定度概括	(12)
表 4.2	功率表的不确定度	(13)
表 4.3	电度表的不确定度	(14)
表 4.4	电压互感器的不确定度	(15)
表 4.5	电流互感器的不确定度	(15)
表 4.6	各种扭矩或功率测量装置的优缺点综述	(19)
表 4.7	各种轴功率测量方法典型的不确定度总结	(19)
表 4.8	锅炉给水泵驱动汽轮机试验的测量不确定度	(20)
表 4.9	典型转速测试仪的测量不确定度	(21)
表 4.10	主流量测量的基本不确定度	(23)
表 4.11	不带整流器的孔板和喷嘴流量测量段上游最小的直管段长度	(27)
表 4.12	放射性示踪剂的不确定度	(30)
表 4.13	压力计的不确定度	(31)
表 4.14	静重式压力表的不确定度	(31)
表 4.15	弹簧管压力表的不确定度	(32)
表 4.16	变送器的不确定度	(32)
表 4.17	排汽压力探头数目	(33)
表 4.18	热电偶和电阻温度计的不确定度	(34)
表 4.19	液体玻璃管温度计的不确定度	(34)

表 5.1	置信度为 95% 时的学生氏 t -分布值和代用 t -分布值	(38)
表 5.2	选定参数对热耗不确定度的影响	(42)
表 5.3	仪表引起的热耗不确定度	(49)
表 5.4A	时间变化性产生的热耗不确定度	(53)
表 5.4B	空间变化性产生的热耗不确定度	(54)
表 5.5	热耗总不确定度	(55)

附录 I	再热循环汽轮机性能试验测量不确定度的计算	(56)
------	----------------------------	------

附录 I	图 3.2 的推导	(68)
------	-----------------	------

附录 II	参考文献	
-------	------	--

图 I.1	热平衡图	(70)
-------	------------	------

图 I.2	初蒸汽为过热蒸汽的一次再热汽轮机初压修正系数	(62)
-------	------------------------------	------

图 I.3	初蒸汽为过热蒸汽的一次再热汽轮机初温修正系数	(62)
-------	------------------------------	------

图 I.4	初蒸汽为过热蒸汽的汽轮机再热器压降修正系数	(64)
-------	-----------------------------	------

图 I.5	初蒸汽为过热蒸汽的汽轮机再热温度修正系数	(64)
-------	----------------------------	------

图 I.6	初蒸汽为过热蒸汽的汽轮机排汽压力修正系数	(66)
-------	----------------------------	------

表 I.1	单独测量误差所引起的计算热耗误差	(67)
-------	------------------------	------

表 I.1	平均范围分布的相关值	(69)
-------	------------------	------

美国机械工程师学会性能试验规程报告

汽轮机性能试验测量不确定度评价导则

第0章 绪 言

0.01 ANSI/ASME PTC6—1976(R1982)汽轮机试验规程(以下简称“规程”),提供了汽轮机的精确试验方法,其目的在于获得不确定度最小的汽轮机性能水平。此规程以采用精密的仪表和最佳的测量方法为基础,被推荐用于汽轮机验收试验。

0.02 为了方便及经济起见,代用仪表和方法有时被加以考虑并常常得以采用。在这种情况下,如果要将试验结果与预期的性能指标加以比较,则试验双方应事先就试验与 PTC6 相违背的各个方面达成协议。采用代用仪表和方法将会影响试验的精度。产生的误差的大小及其对最终结果的影响便成为试验双方要解决的一个主题。建议试验双方在设计和筹备阶段,尽可能就所有与 PTC6 相违背的方面进行讨论并达成协议。对于要把试验结果与预期的性能指标加以比较的试验,如果事先没有达成协议,则不能开始试验。本报告的目的就在于为试验双方提供一个导则,从而根据工业试验和数据的统计处理来得出不确定度的数值。

第1章 目的和范围

1.01 本报告的目的在于为试验双方提供指导,以便当试验与 PTC6 规程的要求有违背时,用以确定试验结果不确定度的程度。

1.02 试验双方应熟悉规程。由于本报告没有包含完整的试验方法,故它只能和 PTC6 规程结合起来使用。本报告中没有给出代用仪表和方法的地方则应遵照 PTC6 规程进行。

1.03 在本报告中给出了各类精度的仪表的不确定度数值。这些数值是专业技术人员公认的,它们被控制在 95% 的不确定度范围内。因此,平均起来讲,在二十个实例中仅有一例会超出。

1.04 制定这些数值时,所用到的参考资料列在附录Ⅲ中。^①

第2章 术语的说明和定义

2.01 本报告将使用规程第2章所述的术语。

2.02 在本报告中,“不确定度”是由委员会选择出的一个可能的误差值,并预期在20个例子中不会多于一例超出这些数值。“误差”的定义是真实值与仪表读数的修正值之差。

第3章 指导性原则

3.01 当试验不按照规程进行时,试验双方必须在试验前就预期的试验读数不确定度达成协议,并确定出预期的试验结果总的综合不确定度。

3.02 本报告第4章中给出了用于协商测量仪表误差的数值。试验结果总不确定度的计算方法见第5章。

3.03 仪表的校验

由于减少了固有偏差或测量值的飘移,仪表的校验在减少试验不确定度中起着重要的作用。在性能试验中,“校验”被定义为这样一个过程,即:确定出仪表或装置的指示值与具有国家标准局标准认可的已知不确定度的标准值之间的偏差。校验必须涉及仪表所用到的整个范围。校验点之间的间隔及这些点之间插值的方法要选择得使校验的不确定度最小。

对预期的试验值整个范围一系列的测量所得出的偏差进行列表和绘成曲线,这些表和曲线以及从校验过的仪表上所读的数值,均可做为对试验数据进行修正的校验数据。校验报告应由校验试验室负责人签发。当要求一份正规的校验报告时,校验报告应包括下述内容:校验设备和仪表的标记、校验过程的描述、测量标准的不确定度的说明,以及校验数据的记录表。

流量测量装置校验时应装配上其上、下游直管段,包括相应的整流及压力恢复装置。如果现有的校验装置不能对试验时预计的整个雷诺数范围进行校验,允许按照PTC6规程第4.33节的要求对校验数据进行外推。

精确度比的定义是这样的,它是标准测量装置的精确度与被校仪表精确度之比。对于校验工作来说,这个比值的推荐值为10:1。新近开发的高精度试验仪表,可使这一比值降到4:1。

校验时的环境必须加以考虑。即使在实验室环境下,测量的质量和测量仪表仍受振动、磁场、环境温度、电源电压的不稳定以及其它变化的影响。

3.04 如果试验时达不到规程所要求的读数频率、试验读数容许的变化及规定的循环泄漏量极限,则必须就由此可能增加的不确定度达成协议。

3.05 读数频率和试验持续时间

记录试验数据的频率和试验持续时间取决于试验数据随时间的变化性。【参见第5.02节

^① 原文为“第6章”,应为“附录Ⅲ”——译注

中(b)】。如果试验不按照规程要求的仪表,而是按照试验双方试验前协商达成的不确定度来进行,则应把由于随时间变化产生的影响降低到最小的程度,以防止该不确定度的增加。为了避免对试验前达成的不确定度有明显的影响,可以用图 3.1 作为指导,确定出每个测量参数最大的时间变化性对试验结果的影响。本图并结合使用图 3.2 和表 3.1,给出了这种情况下估算试验要求的读数次数的方法。在第 5.12 节中给出了使用图 3.1 和图 3.2 的例子。本报告附录 I 给出了图 3.2 的推导过程。图 3.2 中所用的术语如下:

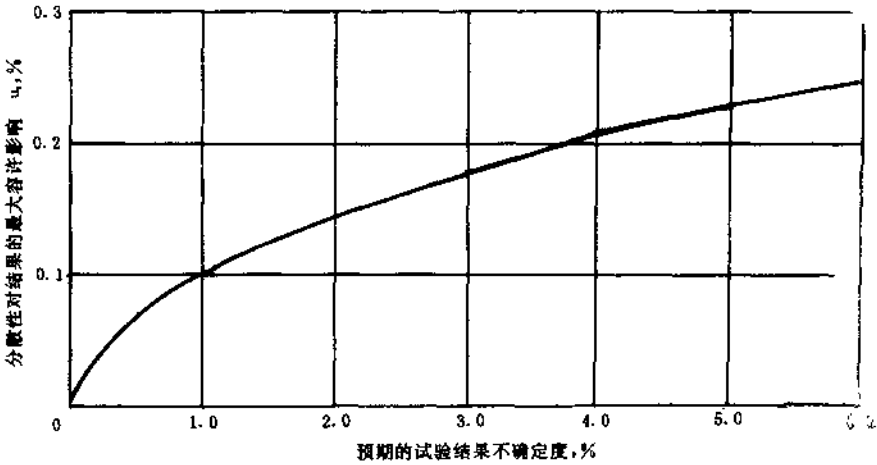


图 3.1 各种测量中试验数据分散性对试验结果影响的最大推荐值

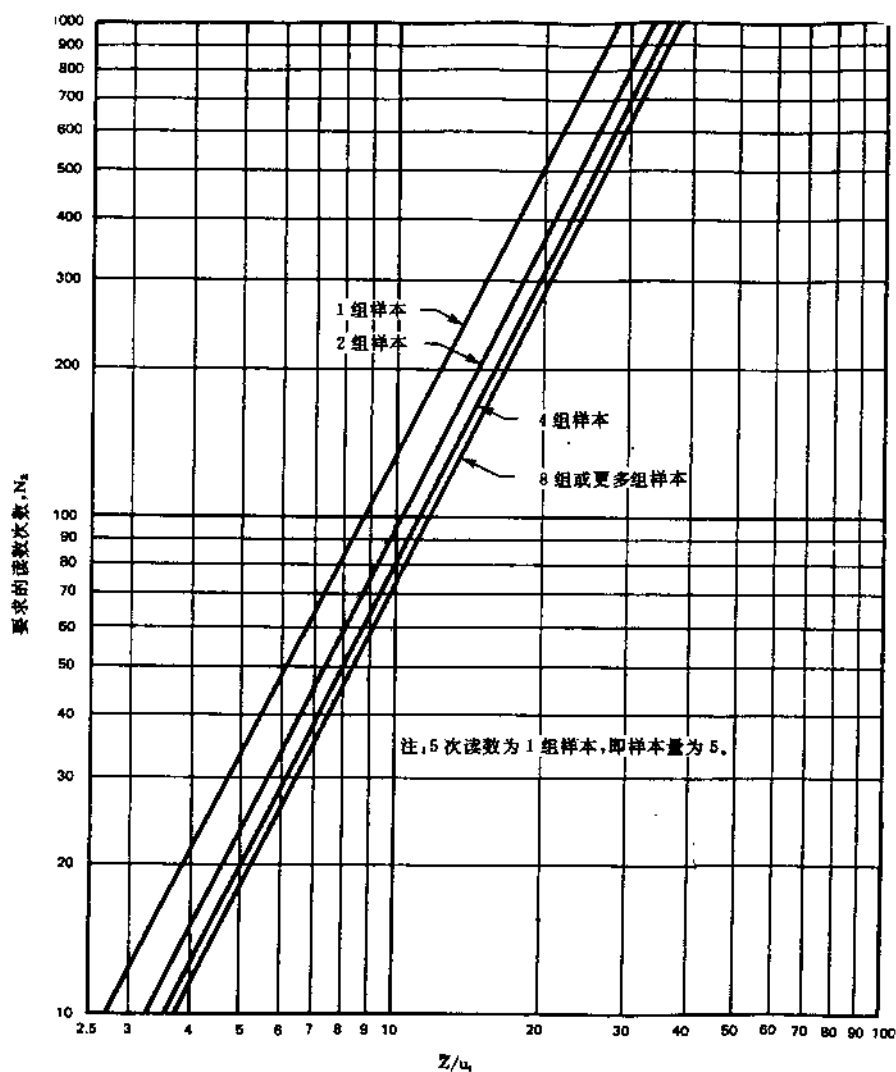


图 3.2 为使试验数据分散性引起的试验结果附加不确定度最小而要求的读数次数

$\bar{Z}$ ——考虑了样本有 5 次读数后, 仪表读数(平均范围)对试验结果的影响, 其表达式如下:

$$\frac{\theta_1 (I_{\max} - I_{\min}) 100}{0.5 (I_{\max} + I_{\min})} \text{ 的平均值; 或者: } \theta_2 (I_{\max} - I_{\min}) \text{ 的平均值}$$

译注：先求每一样本的平均值，再求所有样本的平均值。

- 式中：
- θ_1 —— 从表 3.1 查得的影响系数，读数的每百分率影响。
 - θ_2 —— 从表 3.1 查得的影响系数，读数的每单位影响。
 - $I_{\max} - I_{\min}$ —— 被考虑的每组样本的五次读数中最大读数减去最小读数。
 - $0.5(I_{\max} + I_{\min})$ —— 五次读数的近似平均值。这一项也可用观测平均值代替。
 - U_i —— 试验数据分散性对试验结果的最大允许影响，百分数，查图 3.1。

表 3.1 计算图 3.2 中 Z 用的影响系数 θ_1 和 θ_2

数 据 类 型	θ_1	θ_2
功 率	1.0	...
用称重水箱测定流量(容积流量)	1.0	...
用流量喷嘴差压测定流量	0.5	...
蒸汽压力和温度	$\theta_1 + \theta_1'$	$\theta_2 + \theta_2'$
给水温度	...	θ_2'
排汽压力	θ_1'	θ_2'

- 注：(a) θ_1 表示仪表读数的每百分数的百分比影响。
 (b) θ_2 表示每单位仪表读数的百分比影响。
 (c) θ_1' 和 θ_2' 是修正系数曲线的斜率。
 (d) θ_1' 和 θ_2' 是用来考虑为确定出现在热耗方程中的焓值，而进行的有关测量仪表读数范围随时间变化的影响。可应用图 5.4、图 5.5、图 5.6 或图 5.7 来获得。将图上的纵座标转换成绝对温度或绝对压力*的每百分数的百分比影响，则可得到 θ_1' ，或者转换成每单位读数的百分比影响即得到 θ_2' 。

试验时间的安排

3.06 不管验收试验的计算不确定度被承认与否，试验时间的安排应依照规程的第 3.04 节进行。及时进行试验可减小由于正常运行时的老化(性能恶化)和结垢引起的汽轮机性能的附加不确定度。

3.07 试验前应对下述有关试验时间安排的指导加以考虑，按照优先顺序排列如下：

- (a) 按照规程的推荐，试验应该在首次启动后，实际情况允许下立即进行。
- (b) 如果试验必须推迟，则应安排在停机检修后立即进行，检修期间各种缺陷已被消除。
- (c) 如果(a)和(b)都不可能，机组的状况可用下面的方法来加以确定：
 - 1) 对于在过热蒸汽区运行的汽轮机部分，将试验时的焓降效率试验结果与初次启动时所做的焓降效率试验结果进行比较，以提供要考虑比较结果影响方面的指导。
 - 2) 重新检查运行及化学水处理的原始记录。
 - 3) 重新检查有关压力——流量的运行数据。特别是第一级后蒸汽室、再热入口、连通管和抽汽口处压力——流量关系的数据。

* 原文中只有绝对温度，但参考 PTC6 规程，应再加上绝对压力——译者注

4) 检查热力循环中流量测量元件是否有积垢。

5) 从排汽端检查末级。

(d) 如果没有原始的运行基准数据可以利用,则不能确定出实际的总老化状况。然而,如果有把握确信机组没有损坏并且没有过多的结垢,那么经过双方讨论同意可以确定出老化的估算值,并且在将试验结果与保证值加以比较时考虑其影响。

为了便于指导,可以用图 3.3 来确定在过热区工作的汽轮机的老化估算值。图中的曲线是以工业经验为基础绘出的,代表了具有良好运行和化学水处理历史的机组的平均预计老化情况。该曲线是从许多种型号汽轮机定期进行的焓降效率试验结果得出来的。可以用附录 III 中参考文献(13)所引用的方法来确定老化对热耗的影响。先用高压和中压缸焓降效率试验数据,并假定低压缸的老化是中压缸老化的一半,来计算出老化的估算值。然后给该数据的平均值乘上代表容积流量及机组容量的因子,从而作出这条曲线。该曲线对于再热及非再热的化石燃料机组均适用,系数 f 取 1.0。核电管理委员会出版的核电机组性能数据研究指出,核电机组平均的预计老化是化石燃料机组预计老化的 0.7 倍。因此,只要给图 3.3 中的曲线和公式上乘以 0.7,则可以用来预计一台运行良好的核电机组热耗恶化百分估计值。

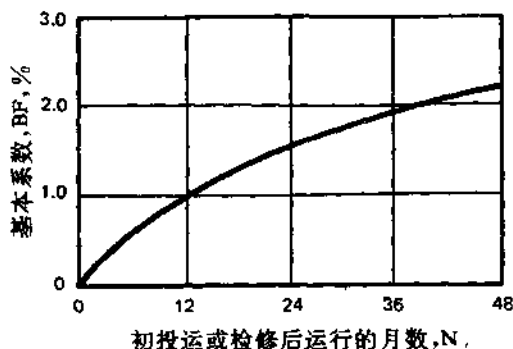


图 3.3 基本系数, %

注: (a) 运行 N 个月后, 热耗恶化百分数的估算值 $= \frac{BF}{\log MW} \sqrt{\frac{\text{初压力, psig}}{2400}}$ (f)

式中, MW —— 汽轮机功率, MW

f —— 对化石燃料机组取 1.0, 对核电机组取 0.7

(b) 汽轮机揭缸时间不包括在内。

(c) 当没有其它数据用来确定老化情况时, 可用该曲线作为指导。

(d) 尽管操作正确, 化学水处理也良好, 但是如果运行条件超出操作者的控制范围, 那么热耗的恶化值将大于按照图中曲线查算得出的值。

例如: 估算出一台 150MW, 1800 psi 的汽轮机正常运行 12 个月后的老化情况, 先从图 3.3 上查出 $N=12$ 时的基本系数, 然后用图上给出的公式计算老化的估算值, 对化石燃料机组系数 f 取 1.0。从图上曲线查得 $N=12$ 时基本系数为 1.0, 这样由下式得出热耗恶化的估算值为 0.4%。

$$(1.0/\log 150) \sqrt{(1800/2400)} (1.0) = 0.4\%$$

(e) 对于有损伤记录的机组,其老化的大小无法确定。那么老化的计算方法和老化的容许极限的确定必须得到参加试验双方的多次协商。损伤的类型有:

- 1) 发生过汽轮机的任何部分进水事故
- 2) 不寻常的轴振动和平衡盘的移动。
- 3) 凝汽器热井水的不正常的导电度。
- 4) 锅炉给水中二氧化硅含量过高。
- 5) 主蒸汽和再热蒸汽出现较大的超温。
- 6) 锅炉管子的剥落迹象。

第四章 测量仪表和测量方法

4.01 规程第 4.01 节认为一些专门的协议可能是需要的。当(双方)同意偏离规程要求时,本报告为评价这种偏离的影响和确定所造成的精确度下降提供了依据。试验双方必须认识到,精确度降低将会使试验结果的不确定度增加,在整理试验结果时必须考虑到这一点。

4.02 必须遵守规程第 4.03 节中有关常用仪表及其安装的要求。但也可以使用其它型号的仪表。这种替代将在本报告适当的章节中加以讨论。

三相交流电功率的测量

4.03 总的要点

三相电功率或能量测量的精确度取决于选择合适的测量系统(既可以用功率表,也可以用电度表)和测量时所用的所有装置的精确度。本节讨论下列内容:

- (a)发电系统的连接型式,合适的测量方法及其不确定度;
- (b)代用的测量方法及其不确定度;
- (c)仪表常数和读数不确定度;
- (d)仪表互感器及其测量不确定度;
- (e)未经校验的电站仪表及其测量不确定度;
- (f)功率测量的总不确定度;

4.04 发电系统的连接型式,合适的测量方法及其不确定度。

测量电功率或能量的 Blondel 氏原理指出,在 N 根导线的电力系统中,需要用 $(N-1)$ 个测量元件来测量系统理论上的实际功率或能量(假定用标准仪表和仪表互感器)。因此,很显然发电系统的连接决定了测量系统的选择。

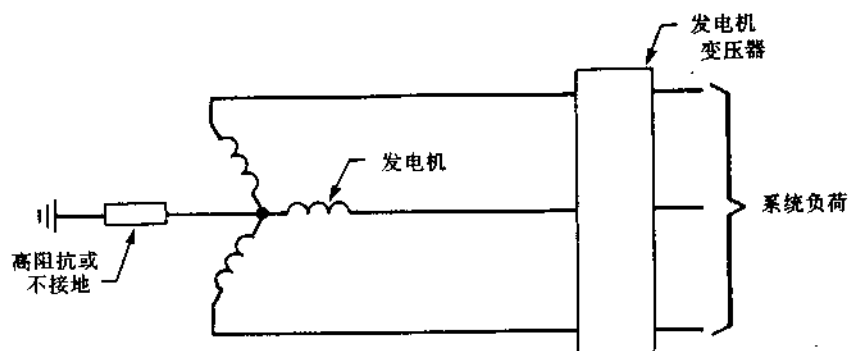
三相发电系统的连接方式可以分为二种基本型式:一种是采用三相三线制连接系统,没有中线返回到电源。另一种是三相四线制连接系统,其第四根导线将中性电流返回到发电机。

为了有助于识别发电系统的连接方式,下面讨论一些不同类型的常用三相三线制和三相四线制发电连接系统。

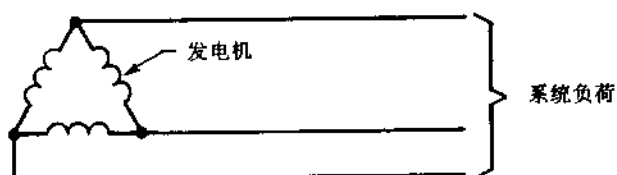
(a)最常见的三相三线制系统由配有高阻抗中性接地装置的星形(Y型)连接的发电机组成。发电机被直接连接到发电机变压器的一个三角形初级绕组上。负荷分配在变压器的次级绕组,即变压器接地的 Y 型侧[参看图 4.1(a)]。发电机变压器负荷分配侧的负荷不平衡将会出现在 Y 型连接的接地线中出现中性电流。然而,在变压器的发电机侧,由于是 Δ 形绕法,中性电流被有效地过滤掉了,因而不需要接中性导线。

不接地的 Y 型连接发电机较经高阻抗接地的 Y 型连接发电机来说用得较少。但是,当和一个 Δ -Y 型接地连接的变压器配合使用时,这种连接仍可组成三相三线制发电机连接系统

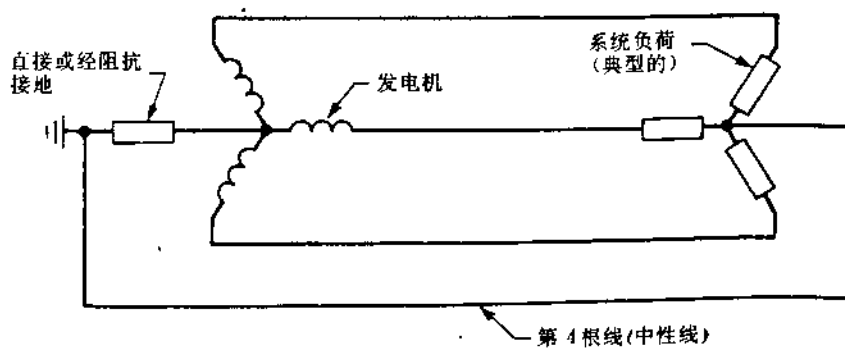
[参看图 4.1(a)]。



(a) Y型连接的发电机——三相, 三线制



(b) Δ 型连接的发电机——三相, 三线制



(c) Y型连接的发电机——三相, 四线制

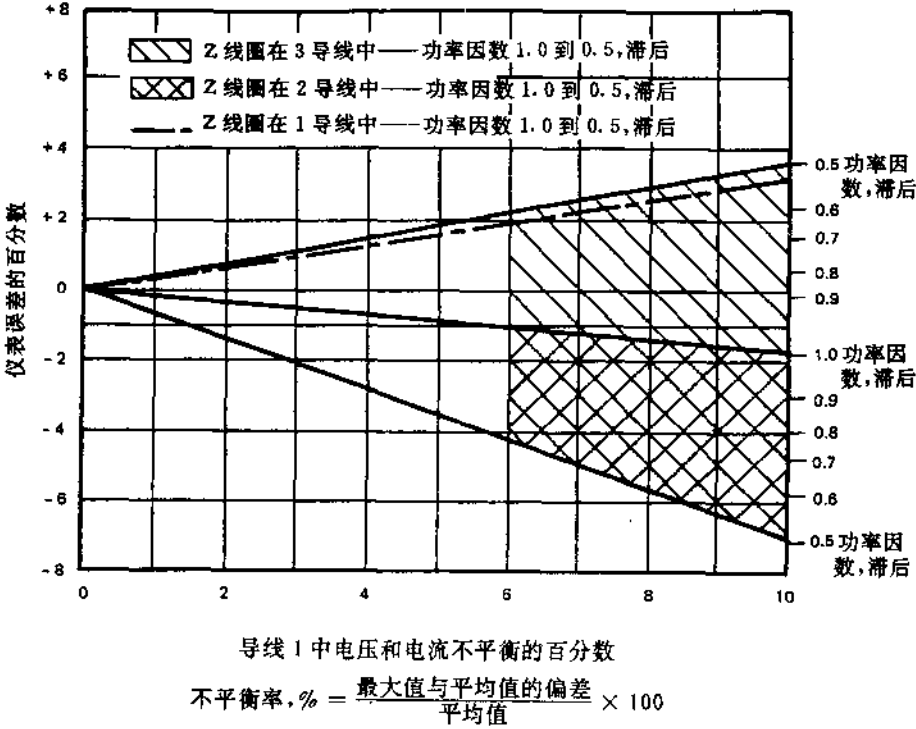
图 4.1 发电机连接型式

三相三线制发电机连接系统的最后一个例子是发电机采用△形接法。由于△形接法的发电机没有中性接点,从而省去了中性导线,这样连接的发电机只能接到三线制系统中去[参看图 4.1(b)]。

(b)三相四线制发电机连接系统的建立可以只采用一个 Y 型连接的发电机,其中性点既可直接地接地,或者更为典型的是通过一个阻抗接地。负荷分配是在发电机的电压端实现的,而不是用△-Y 型发电机变压器将其与发电机分开。在这种型式的连接系统中,有一独立的第四根导线,直接把发电机的中性点(或中性接地装置)和负荷的中性点连接起来[参看图 4.1(c)]

(c)对于上述的发电系统连接方式,借助于正确地选择和使用测量系统(可参看表 4.1 中关于测量方法不确定度的总结),则可获得在各种负荷功率因数和不平衡时,理论上的精确测量(即:测量方法不增加不确定度):

- 1)对三相三线制发电机连接方式,采用二个单极(静子)表或一个双极(静子)多相表。
- 2)对三相四线制发电机连接方式,采用三个单极(静子)表或一个三极(静子)多相表。



总注:

- (a)这些数据经允许取自 Edison 电力研究所 1965 年出版的《电力测量人员手册》(第七版)。
- (b)上述曲线中的 Z 形线圈位置,请参见图 4.3(a)。

图 4.2 用于一相电路中等效电压和电流不平衡及 $2 \frac{1}{2}$ 静子电度表三种可能的 Z 形线圈位置的误差曲线

4.05 代用的测量方法及其不确定度

(a)不是全部现有的三相四线制发电机装置都配有足够的仪表互感器来按照 Blondel 氏原