



联合循环发电机组 性能验收试验方法

■ 王铭忠 编著

LIANHE XUNHUAN
FADIANJIZU
XINGNENG YANSHOU
SHIYAN FANGFA



中国电力出版社

www.cepp.com.cn

联合循环发电机组 性能验收试验方法

王铭忠 编著



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

内 容 提 要

本书为 DL/T 851—2004《联合循环发电机组验收试验》的配套读物，主要内容为试验前的准备工作，试验边界与测量参数、参数测量与仪器仪表、试验工况、试验步骤与过程，试验数据整理、机组特性计算、联合循环机组特性的修正与评定。联合循环机组性能不合格时供货商责任划分等。

本书可供电力建设相关从业人员，联合循环机组用户、试验操作人员等参考使用。

图书在版编目 (CIP) 数据

联合循环发电机组性能验收试验方法/王铭忠编著.

北京: 中国电力出版社, 2006

ISBN 7-5083-4183-X

I. 联... II. 王... III. 火力发电: 联合循环发电-发电机-机组-性能试验 IV. TM621.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 021529 号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路 6 号 100044 <http://www.cepp.com.cn>)

北京同江印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2006 年 6 月第一版 2006 年 6 月北京第一次印刷

850 毫米×1168 毫米 32 开本 3.5 印张 85 千字

印数 0001—3000 册 定价 8.00 元

版 权 专 有 翻 印 必 究

(本书如有印装质量问题, 我社发行部负责退换)

作者简介：



王 铭 忠，
男，1938年
生，1964年
毕业于清华
大学燃气轮
机专业。西
安热工研究

院教授级高级工程师。四十多年来一直从事燃气轮机与联合循环发电技术研究工作。多次获电力工业部、陕西省、辽宁省、黑龙江省、沈阳市等科技成果奖。目前在参加国家“十五”863课题“IGCC电站设计集成与动态特性研究”工作等。多年来曾在各刊物上发表学术论文50余篇，参加编写的出版著作有《热工技术手册》、《中国电力百科全书》等，主持与参加编写制定国家标准、电力行业标准若干。

前 言

燃气轮机—蒸汽轮机联合循环（简称联合循环）发电，是一种梯级利用能源的高效、清洁的发电方式，其先进的现代天然气联合循环发电热效率已经达到 60%，远远超过超超临界蒸汽机组发电的效率，是当今热效率最高的环保、实用发电技术，受到各国电力界的广泛关注，成为当今世界各国电力建设的主流。随着我国经济的发展和人民生活水平的提高，我国电力工业面临一场深刻的技术革命，联合循环发电则成为我国电力革命的重要方面之一。

近年来，我国经济、电力主管部门对燃气轮机与联合循环发电技术取得共识，加之天然气资源的大力开发、先进的煤气化技术与整体煤气化联合循环（IGCC）发电技术的迅速发展，我国开始积极发展燃气轮机技术，并引进了数十台（套）大容量的燃气轮机与联合循环发电设备，正在加紧建设总容量达数千万千瓦的几十个联合循环电站。目前及今后若干年，我国将有大量联合循环发电机组陆续投入运行。为方便电力建设部门及联合循环机组用户验收机组性能，指导试验者进行试验操作，帮助业主和供货商对联合循环机组性能评定达成一致，分清责任，我们根据国际标准 ISO2314 1989/Amd.1:1997 (E)、中国国家标准 GB/T 18929—2002、中国电力行业标准 DL/T 851—2004 和美国国家标准 ASME PTC 46—1996 编写了本试验方法，以作有关方面工作参考。

联合循环发电机组按其热力循环方式可分为余热利用式、给水加热式、排气再燃式和正压锅炉式；按其轴式结构可分为单轴结构、分轴结构和多轴结构。正压锅炉式以蒸汽循环发电为主，

因其正压锅炉结构复杂、造价高，对于燃气初温很高的现代燃气轮机不能充分发挥其高效作用，现在基本没有人使用正压锅炉循环方式；给水加热式和排气助燃式不能充分利用燃气轮机排气余热，仅适用于蒸汽老厂改造；余热利用式能够充分利用余热锅炉回收燃气轮机排气余热，特别适合现代高温燃气轮机，循环热效率高，现代市场上的联合循环机组都是余热利用式联合循环机组。因此，目前各国际标准和本方法所述的验收试验都是指余热利用式联合循环机组的性能验收试验；给水加热式、排气再燃式和正压锅炉式联合循环机组的性能验收试验可参考使用。至于不同轴式结构的联合循环机组仅是测点布置、数量不同而已，本方法也完全适用。

本书由以下 11 个部分所组成：

(1) 概述。说明联合循环发电机组性能验收试验的目的、内容及试验的指导原则和依据的试验标准。

(2) 试验前的准备工作。说明试验者在试验前应该做的准备工作，包括：制定试验计划、编写试验大纲、准备试验用仪器仪表及安装测点等。

(3) 试验边界与测量参数。说明如何划定联合循环机组、机岛、炉岛的试验边界以及试验中应该采集测量的参数。

(4) 参数测量和仪器仪表。说明为保证标准要求的试验测量性能不确定度的各种参数的测量方法、仪器种类、精度要求等。

(5) 试验工况。说明试验工况、运行条件与合同保证性能的关系，以及应如何控制的机组试验工况、选择运行条件。

(6) 试验步骤与过程。说明试验过程的操作程序与要求。

(7) 试验数据整理、机组特性的计算。说明对试验测得数据的整理分析方法和根据测量数据计算试验状态下机组性能的方法。

(8) 联合循环机组特性的修正与评定。说明如何将试验状态下机组性能修正到合同规定条件下的修正性能，以及根据合同保

证条款评价机组性能的方法。

(9) 联合循环机组性能不合格时供货商责任的划分。说明当联合循环机组性能不合格时, 如何根据炉岛、机岛性能测量结果计算炉岛、机岛对机组性能偏差所应承担的责任份额。

(10) 试验结果不确定度的分析。说明为分析试验结果准确程度, 对试验结果进行不确定度分析的方法。

(11) 试验报告。说明试验报告所应包括的内容。

同时, 书后附有以下两个附录: 附件 I 给出了 ISO2314 1989/Amd.1: 1997 (E) 国际标准的联合循环机组性能修正曲线的形式与种类。附件 II 给出了某一具体大型联合循环机组性能试验的整套机组、机岛、炉岛实用性能修正曲线。

本书承蒙安敏善教授予以细心审阅, 并提出许多宝贵和有益的修改意见, 在此特致衷心谢意。

限于本人水平有限, 时间仓促, 文中恐有不当或错误之处, 望读者多提宝贵意见, 感激之至。

作者

二〇〇五年十二月 于西安

目 录

前言

1 概述	1
2 试验前的准备工作	4
2.1 试验的早期准备工作	4
2.2 制订试验计划	4
2.3 编写试验大纲	4
2.4 准备试验用仪器仪表	5
2.5 安装试验仪表	5
3 试验边界与测量参数	6
3.1 试验边界	6
3.2 测量参数	7
4 参数测量和仪器仪表	10
4.1 压力测量	10
4.2 温度测量	12
4.3 流量测量	14
4.4 燃料测量	21
4.5 功率测量	24
4.6 功率因数测量	24
4.7 发电机转速 (或频率) 测量	24
4.8 举例	25
4.9 Alstom 公司对测量仪表及其精度的要求	29

5 试验工况	35
5.1 运行条件	35
5.2 负荷状态	36
6 试验的步骤与过程	40
6.1 验收试验的时间	40
6.2 验收试验的阶段划分	40
6.3 关于预备性试验	40
6.4 正式验收试验	41
6.5 稳定工况	42
6.6 系统隔离	43
6.7 数据采集次数和持续时间	45
7 试验数据的整理、机组特性的计算	48
7.1 试验数据整理	48
7.2 根据试验测量结果计算试验状态下机组性能	50
8 联合循环机组特性的修正与评定	52
8.1 规定条件下联合循环机组特性的修正计算	52
8.2 联合循环机组性能的评定	66
9 联合循环机组性能不合格时供货商责任的划分	67
9.1 机岛与炉岛的责任划分原理	67
9.2 炉岛性能试验与规定条件下余热锅炉各蒸汽 产量的修正计算	68
9.3 规定条件下的机岛特性的修正计算	70
9.4 联合循环机组性能偏差的责任划分	76

10 试验结果不确定度的分析	79
10.1 测量参数的不确定度	79
10.2 变量的不确定度	83
10.3 试验结果的不确定度	83
11 试验报告	85
附录 I 国际标准 ISO2314 1989 /Amd.1: 1997 (E) 给出 的联合循环机组性能修正曲线	86
附录 II 某联合循环发电机组的修正曲线	89
II.1 CC 机组整体特性的修正曲线	89
II.2 炉岛特性的修正曲线	93
II.3 机岛特性的修正曲线	97
参考文献	101

1

概 述

联合循环电站建设工程在完成机组安装、调试之后，移交业主之前，必须对机组热力性能进行验收试验，以考核机组热力性能是否达到设备供货合同所规定的技术指标，并作为执行合同赔偿条款的依据。

在发电设备供货合同中通常规定两项设备供应方必须保证的热力性能指标：

(1) 在规定运行条件与基本负荷状态下，整套联合循环发电机组的输出功率；

(2) 在规定运行条件与基本负荷状态下，整套联合循环发电机组的热效率、热耗率或燃料消耗率。

若此两项指标中任何一项达不到合同保证值时，将追究设备供应方责任并按合同规定进行经济赔偿。联合循环发电机组验收试验的目的就是确定与性能保证值有关的上述两项联合循环机组热力性能。

联合循环机组热力性能考核值有“净”值与“毛”值之分，这应在供货合同中规定明确。通常在机组全部设备由一个总包方供货的情况下，合同保证值应是机组的“净性能”，即机组的净总功率（供电总功率）和净热效率（供电热效率）或净热耗率（供电热耗率）；当各主要发电设备由不同供应方供货，并且辅机数量众多其耗功不易准确测定时，合同保证值可采用“毛性能”，即机组的毛总功率（发电总功率）和毛热效率（发电热效率）或毛热耗率（发电热耗率）（注：所谓“毛功率”是指设备的直接作功能力。当发电机采用同轴励磁机励磁时，毛功率就是发电机端子测量功率；当发电机采用厂用电励磁即静态励磁时，机组毛

功率为发电机端子功率减去消耗厂用电的励磁功率)。

联合循环发电机组的热力性能除取决于设备本身的设计完善性和加工制造质量以外,还与机组的负荷工况、运行条件等密切相关。因此,考核机组性能应是在合同规定的机组运行基准参考条件(简称规定运行条件)下的基本负荷特性参数值。

为了保证试验结果的准确性,必须掌握正确的试验方法,制订适当的试验方案,并严格选用仪器仪表,仔细准确试验操作。而先进的试验标准都是长时间丰富实践经验的总结,因此,为了保证试验结果的准确可靠,必须选择先进的试验标准作为试验的指导和依据。

本书根据目前国际上广泛公认的国际标准 ISO 2314—1989/Amd.1: 1997 (E)《联合循环电站验收试验》、美国国家标准 ASME PTC 46—1996《Performance Test Code on Overall plant Performance》、中国国家标准 GB/T 18929—2002《联合循环发电装置验收试验》和中国电力行业标准 DL/T 851—2004《联合循环发电机组验收试验》的规定,讲述了为确定或验证联合循环发电机组输出功率和热效率(或热耗率)而进行的验收试验的程序和规则,并为验收试验提供了测量方法和把试验结果从试验状态修正到合同保证性能的规定条件下的方法。

目前,国际上公布执行的联合循环机组验收试验标准,无论是 ISO2314 1989/Amd.1: 1997 (E) 或是 ASME PTC46—1996,都是针对包含在一个总合同中供货的整套联合循环发电机组性能的验收。当燃气轮机、蒸汽轮机和余热锅炉等主要设备由不同的独立合同订货、各设备性能由各相应供货商分别保证时,各独立合同应明确合同设备(或设备组合)的外特性及与其相连接设备的接口性能参数,采用相应各设备的有关标准,按各设备(或设备组合)的外特性及接口性能分别进行验收试验。

当机岛(燃气轮机、蒸汽轮机和发电机)与炉岛(余热锅炉)分别由不同供货商供货,而供货合同保证整台机组性能时,

如果性能验收试验表明整台机组性能不合格,则应进一步试验划分机岛与炉岛的责任份额。本方法中关于机组特性试验部分的内容是依据 ISO2314 1989/Amend.1: 1997 (E) 和 ASME PTC 46—1996 标准编定的,而关于对性能不合格机组的机岛与炉岛的责任份额划分方法,则是作者结合国外经验的研究成果,因此叙述的要稍为详细一些。

2

试验前的准备工作

2.1 试验的早期准备工作

机组供货合同签订后，在设备设计阶段应召开供货方与试验方、业主、设计院共同参加的联络工作会议，讨论确定性能保证值定义、试验系统边界和试验测点等，以便在设备加工制造、机组安装阶段予以实施。

2.2 制订试验计划

在进行试验之前应制订详细的试验计划，并经试验方、业主与供货方等签字认可。试验计划应包括试验目的、试验时间表、试验各方的责任、试验大纲。试验计划还应反映合同中与性能保证值有关的要求，并对合同条款做出解释。

2.3 编写试验大纲

试验大纲是指导验收试验的准备、进行与最后获取试验结果的纲领性文件。试验大纲应包含：试验目的、验收标准、基准参考条件、测试参数、测点位置、运行条件、环境条件、仪表的精度、校验和测量方法；燃料、吸附剂、飞灰等物质的采样、收集、处理和化验分析；清洁度核查、运行方式设定，对试验结果有重大影响的所有内部热能和辅助功率的计算；试验时间安排、预备性试验要求、正式试验要求、试验前的运行稳定时间、测量的次数和每次测量持续的时间、允许运行条件与基准条件的偏差；特性修正曲线或计算公式、综合各次测量参数和试验最终结果的计算方法、技术报告的编写等。

2.4 准备试验用仪器仪表

根据试验大纲中提出的测试参数的性质、数量、类型、测点环境、测试条件及总不确定度要求等选取相应精度的测试仪表，并在试验前对所选用仪表进行校验。

2.5 安装试验仪表

试验所用仪表大致分为两类：随机供应的运行仪表与专用试验仪表。随机供应的运行仪表当然无须再去安装，但专用试验仪表则应在试验前另行安装。专用仪表的种类应根据具体机组的仪表配置、试验的具体要求等而定。需要另行布置测点和安装的专用仪表通常包括发电机功率表、功率因数表、频率表（转速表）、大气温度表、大气压力表、大气湿度表等。当某些重要运行仪表不能满足需要时，可能还需要安装一些相应的临时专用仪表，例如：燃料流量表、燃气透平排气温度表、余热锅炉排气温度表等。其中一些测点如 2.1 所述，应在设备制造或安装施工阶段的早期准备工作中完成。当机岛设备与炉岛设备由不同供应方供货时，为了分析、划分机岛与炉岛等对机组性能影响的责任份额，还需要安装余热锅炉各段蒸汽的流量、温度、压力测点，甚至可能需要安装空气或烟气系统压力、温度、流量测点。

3

试验边界与测量参数

3.1 试验边界

试验边界就是试验考核对象的能流边界。试验边界决定了试验测量参数的范围和性能修正因素的选定及性能计算公式的应用。我们根据进入系统的能量流、输出系统的可用能量流、环境因素等确定特征测量参数。试验时计算的输入和输出能量必须穿过试验边界。

试验边界的确定取决于试验目的和考核对象的范围。对于一个交钥匙工程,考核验收的对象是整个电厂特性,它的试验边界将是整个电厂厂区。这种交钥匙工程的试验与验收都比较简单,在我国电力建设中应用不多。我们实际应用最多的是业主按主设备进行招标,由业主承包的建设工程,建设完成后对机组特性进行考核,验收设备制造质量和建设安装质量,以明确设备供货方和建设施工方的责任。机组特性试验边界应包括属于这台机组的所有设备,本方法是将联合循环发电机组整体性能作为目标进行考核的。即使这样,根据考核目标不同,试验边界的划定也有所不同。例如:如果要考核机组的净出力,应在主变压器的输出端测量机组输出功率,则能流出口边界应划在主变压器的高压端;如果要考核的是机组毛出力,应在发电机的出线端测量机组输出功率(若发电机静态励磁还应扣除励磁功率),则能流出口边界应划在发电机出线端子。如果冷却塔、凝汽器随主机供货,列入性能考核范围之内,应考虑冷却空气—冷却水对汽轮机出力的影响,则循环冷端边界应划在冷却水塔的冷却空气进口处;如果仅仅是凝汽器随主机供货,列入性能考核范围之内,应考虑循环冷却水或冷却空气(空冷凝汽器)对汽轮机出力的影响,则循环冷

端边界应划在凝汽器循环冷却水进口或冷却空气（空冷凝汽器）进口处；如果冷却塔、凝汽器都另外供货，而不列入性能考核范围之内，应考虑汽轮机背压对汽轮机出力的影响，则循环冷端边界应划在汽轮机出口处。在能流入口端，若燃料预处理设备（如增压、加热）在供货范围之内，则能流入口边界应在燃料预处理之前；若燃料预处理设备不在供货范围之内，则能流入口边界应在燃料预处理之后。

3.2 测量参数

试验边界确定之后，就容易根据验收考核目标确定试验的测量参数了。供货范围边界的接口参数是验证合同保证性能所需要的，应特别注意并要求仔细、精确测量。在所有测量参数中，直接参与特性计算、修正的称为一类参数。在一个供货范围内部的参数，主要是用于检测设备运行状态，可以比较简单地进行了测量。这些不直接参与特性计算和修正，而仅用于检查试验状态和试验条件的参数称为二类参数。一类参数应使用高精度的仪表测量，对于一些关键参数测量可在同一位置采用双重或双重测点；在一类参数中，根据各参数对考核性能的影响程度不同（影响程度通常可用“敏感系数”表示），又可分为“1级一类参数”和“2级一类参数”。二类参数一般不需要安装特殊的测量仪表，可使用电厂安装的永久性运行仪表测量。所有一类参数的测量仪表，必须经过法定计量部门校验，具有合格证书并经业主和供货商认可。

联合循环机组性能验收试验需要测量参数的多少与机组构成设备的型式、系统的组成方案等有关。系统组成越复杂，需要测量的参数就愈多。图1所示为具有三压再热蒸汽系统的联合循环机组，是目前现场运行中系统较为复杂的一种，我们以这种具有三压再热蒸汽系统的联合循环机组为例，列举其性能试验的测量参数。为便于说明，将图1之热力系统简化为图2。联合循环机