



火力发电厂模拟量控制系统验收测试规程

Code for acceptance test of modulating
control system in fossil fuel power plant

DL/T 657—2006
代替 DL/T 657—1998

前 言

本标准是根据《国家发展改革委办公厅关于印发 2006 年度电力行业标准项目计划的通知》(发改办工业[2006]1093 号文)的安排,对 DL/T 657-1998《火力发电厂模拟量控制系统在线验收测试规程》进行修编的。

近几年来,新建火电机组模拟量控制系统的应用水平随着控制技术的发展不断提高,在调试质量控制上已打破了基建与试生产的界线;随着分散控制系统的发展,大量 300MW 等级以下的火电机组通过 DCS 自动化改造也实现了协调控制,并参与电网自动发电控制(AGC);编制一本测试项目和质量指标都较为统一和完整的模拟量控制系统验收测试标准是从事热工自动化工作所迫切需要的。

本标准对 DL/T 657-1998 的主要修订内容是:

- 扩大了适用范围,机组容量扩大到 125MW~600MW 等级机组;
- 涵盖了新建或技术改造工程验收测试的各个阶段;
- 在测试项目和质量指标上涵盖整个模拟量控制系统。

本标准自实施之日起,代替 DL/T 657-1998。

本标准的附录 A、附录 B、附录 C 是规范性附录。

本标准由中国电力企业联合会提出。

本标准由电力行业热工自动化标准化技术委员会归口并解释。

本标准负责起草单位:浙江省电力试验研究院。

本标准主要起草人:朱北恒、尹峰。

本标准首次发布时间:1998 年 3 月 19 日,本次是第一次修订。



1 范围

本标准规定了火力发电厂模拟量控制系统验收测试的内容、方法，以及应达到的品质指标。

本标准适用于装设单机容量为 125MW~600MW 等级机组的火力发电厂新建工程各个阶段和技术改造工程的模拟量控制系统验收测试。

其他容量机组的验收测试以及机组检修后的验收测试也可参照本标准执行。

2 规范性引用文件

下列文件中的条款通过本标准的引用而成为本标准的条款。凡是注日期的引用文件，其随后所有的修改单(不包括勘误的内容)或修订版均不适用于本标准，然而，鼓励根据本标准达成协议的各方研究是否可使用这些文件的最新版本。凡是不注日期的引用文件，其最新版本适用于本标准。

| | |
|-------------|---------------------------|
| DL/T 655 | 火力发电厂锅炉炉膛安全监控系统在线验收测试规程 |
| DL/T 656 | 火力发电厂汽轮机控制系统在线验收测试规程 |
| DL/T 659 | 火力发电厂分散控制系统验收测试规程 |
| DL/T 701 | 火力发电厂热工自动化术语 |
| DL 5000 | 火力发电厂设计技术规程 |
| DL/T 5175 | 火力发电厂热工控制系统设计技术规定 |
| DL/T 5190.5 | 电力建设施工及验收技术规范第 5 部分：热工自动化 |

3 术语、定义和缩略语

下列术语、定义和缩略语适用于本标准；本标准采用的其他术语、定义和缩略语参见 DL/T 701。

3.1 模拟量控制系统(MCS) modulating control system

通过前馈和反馈作用对机炉及辅助系统的过程参数进行连续自动调节的控制系统总称。包含过程参数的自动补偿和计算、自动调节、控制方式无扰动切换以及偏差报警等功能。

3.2 协调控制系统(CCS) coordinated control system

对动态特性差异较大的锅炉和汽轮发电机组进行整体负荷平衡控制，使机组尽快响应调度的负荷变化要求，并保持主蒸汽压力和机炉各主要运行参数在允许的范围；在一些特定的工况下，通过保护控制回路和控制方式转换保持机组的稳定和经济运行；主要包括机组负荷指令控制、汽炉主控、压力设定、频率校正、辅机故障减负荷等控制回路；它直接作用的执行级是锅炉控制系统和汽轮机控制系统。

3.3 控制子系统 control subsystem

构成机炉 CCS 的机炉各主要参数的调节系统，主要包括锅炉燃烧控制系统、汽轮机控制系统、锅炉给水控制系统、汽温控制系统等。

3.4 自动发电控制(AGC) automatic generation control

根据电网负荷指令，控制发电机有功功率的自动控制系统。

3.5 负荷变动试验 load change test

在一定的负荷变化范围内，CCS 负荷指令以确定的变化速率和变动量，单方向增加负荷和减少负荷的试验，以考核 CCS 在不同负荷下稳定工况之间的转换能力。

3.6 AGC 负荷跟随试验 AGC-load-follow test



CCS 模拟在 AGC 控制方式下的负荷跟随试验。由调度中心或 CCS 负荷给定回路发出负荷变化指令, 在一定的负荷变化范围内以确定的负荷变化速率进行双向变动试验, 以考核 CCS 的负荷响应能力和适应负荷连续变化的能力。

3.7 辅机故障减负荷(RB) runback

当发生部分主要辅机故障跳闸, 使机组最大出力低于给定负荷时, CCS 将机组负荷快速降低到实际所能达到的相应出力, 并能控制机组在允许参数范围内继续运行称为辅机故障减负荷; RB 试验通过真实的辅机跳闸来检验机组在故障下的运行能力和 CCS 的控制性能, RB 功能的实现保障了机组在高度自动化运行方式下的安全性。

3.8 动态品质指标 transient performance specification

指控制系统在受到内外扰动时, 动态调节过程中被调参数偏离新给定值的允许偏差指标。

3.9 稳态品质指标 steady-state performance specification

指机组负荷变动率小于 $1\%P_e/\text{min}$, 且无明显内外扰动时, 被调参数偏离给定值的允许偏差以及对控制系统稳定性的要求。 P_e 为机组额定负荷。

3.10 过渡过程衰减率 decay ratio

定值扰动试验中, 被调参数首次过调量(M_1)与第二次过调量(M_2)的差值与首次过调量(M_1)之比称为过渡过程衰减率, 用 ψ 示: $\psi = (M_1 - M_2) / M_1$ 。

3.11 稳定时间 settling time

从扰动试验开始到被调参数进入新稳态值的允许偏差范围内不再越出时的时间。

3.12 实际负荷变化速率 actual-load-change rate

实际负荷变化速率($\%P_e/\text{min}$)—实际负荷变化量 ΔP_e /变化时间 Δt (Δt 为从负荷指令开始变化至实际负荷变化达到新的目标值所经历的时间)。

3.13 负荷响应纯迟延时间 dead time of load response

负荷扰动试验开始后实际负荷变化的迟延时间, 即从负荷指令开始变化的时刻到实际负荷发生与指令同向连续变化的时刻所经历的时间。

4 验收测试内容及测试条件

4.1 各阶段验收的主要内容

4.1.1 MCS 在完成对系统整试验工作后, 调试方应附录 A 的 A.1~A.4 的要求对系统进行扰动试验, 以及按第 5 章的要求对系统进行功能测试。测试结果填入附录 B 的表 B.1、B.3 和附录 C 的表 C 中。

4.1.2 新建机组的进行满负荷连续 168h (72h) 试运行期间, 以及机组商业或技术改造机组正式移交生产前, 应提供 MCS 可用率统计运行记录, 可用率的统计计算和考核按第 8 章的要求。

4.1.3 在 CCS 完成细调整试验后, 应按 6.1 的要求进行 CCS 负荷变动试验。

4.1.4 在新建机组商业移交或技术改造机组正式移交生产前, 应按 6.3、6.4 的要求进行协调控制系统 AGC 负荷跟随试验和 RB 试验。

4.1.5 MCS 在完成 4.1.1~4.1.4 要求的全部试验之后, 还应按第 7 章的要求提供试验报告, 按第 8 章的要求提供 MCS 可用率统计运行记录。在机组商业移交或正式移交生产前, 验收方可决定对 MCS 的全部项目或抽查部分项目进行最终验收测试。最终验收测试应按第 5 章、第 6 章的要求进行。

4.2 最终验收测试应具备的条件

4.2.1 MCS 随机组运行 60 天以上, 与 MCS 有关的主、辅设备可控, 机组负荷 $70\%P_e \sim 100\%P_e$ (额定负荷)。



- 4.2.2 实现 MCS 的分散控制系统(DCS)已符合 DL/T 659 的要求。
- 4.2.3 与 MCS 相关的热工自动化现场设备完好, 安装和调试质量符合 DL/T 5190.5 的要求。
- 4.2.4 与 MCS 自动化设备相关的电源、气源、接地、环境条件安装和调试质量符合 DL/T 5190.5 的要求。
- 4.2.5 汽轮机控制系统已完成功能验收测试, 符合 DL/T 656 的要求。
- 4.2.6 MCS 已完成 4.1.1~4.1.4 要求的全部试验, 与验收测试有关的控制系统已投入自动。
- 4.2.7 以下记录参数准确可用: 机组负荷指令、机组实际负荷、主蒸汽压力设定值、主蒸汽压力、烟气含氧量、炉膛压力、主蒸汽温度、再热蒸汽温度、汽包水位等。
- 4.2.8 记录设备分辨率应能满足对其控制系统品质指标评价的要求。
- 4.2.9 与 MCS 有关的设计、制造、安装、调试、运行及故障处理等资料齐全、有效, 技术文档应满足第 7 章的要求。
- 4.2.10 验收测试前应由测试单位编写测试方案, 由运行单位编写操作方案。

5 功能测试

- 5.1 MCS 的功能设计应满足 DL 5000 及 DL/T 5175 的要求。功能测试主要包括控制方式无扰动切换、偏差报警功能、方向性闭锁保护功能、超驰控制保护功能的测试。
 - 5.1.1 控制方式无扰动切换试验主要包含以下内容: AGC 远方/就地控制方式的无扰动切换; CCS 的协调控制方式、锅炉跟随控制方式、汽轮机跟随控制方式之间的无扰动切换; MCS 所有手动/自动方式之间的无扰动切换; 给水控制系统单/三冲量控制方式之间的无扰动切换; 其他要求控制系统实现的无扰动切换。在满足切换条件的情况下, MCS 在各种控制方式之间进行切换时, 不应产生任何扰动。检查上述控制方式无扰动切换是否能正确实现。
 - 5.1.2 MCS 应包含以下偏差报警: 测量信号偏差报警; 执行器偏差报警; 调节器偏差报警; 其他要求控制系统实现的偏差报警。检查上述偏差报警值是否正确设定, 报警输出的开关量信号能否正确送至相应的报警显示和控制保护回路。
 - 5.1.3 MCS 应包含以下方向性闭锁保护功能: CCS 负荷指令增减闭锁; 炉膛压力高/低送引风机动叶调节开/关闭锁; 燃料量和风量交叉限制; 其他要求控制系统实现的方向性闭锁。检查上述方向性闭锁保护是否能正确实现。
 - 5.1.4 MCS 应包含以下超驰控制保护功能: CCS 负荷指令迫增/迫降; 炉膛压力防内爆超驰保护控制; 机组启停时磨煤机超驰控制; 其他要求控制系统实现的超驰控制保护功能。检查上述控制保护回路是否能正确动作。
- 5.2 进行最终验收的功能测试时可根据情况进行抽测, 将功能测试结果填入附录 B 的表 B.1 中。

6 性能测试

- 6.1 CCS 负荷变动试验
 - 6.1.1 测试条件见 4.2。
 - 6.1.2 调整机组负荷到试验负荷段, 稳定机组运行工况; 在机炉协调控制方式下, 负荷指令以直吹式机组 $2\%P_e/\text{min}$ 或 $3\%P_e/\text{min}$ 的变化速率、中储式机组 $3\%P_e/\text{min}$ 或 $4\%P_e/\text{min}$ 的变化速率、 $\Delta P=15\%P_e$ 的负荷变动量进行单方向变动试验; 待机组负荷及各主要参数稳定运行 10min 后, 再进行反方向的变动试验; 增减负荷试验各进行 1~3 次, 可选择其中一次的试验数据作为验收测试结果, 填入附录 B 的表 B.2 中。



6.1.3 当机组运行工况稳定(机组负荷稳定,或机组给定负荷变化速率小于 $1\%P_e/\text{min}$,且各子系统无明显内外扰动)后,分别记录机组各主要参数变化曲线(试验时间不少于 1h,也可利用DCS的历史数据),将各参数波动量最大偏差数据填入附录B的表B.2中。

6.1.4 负荷变动试验时,CCS及各控制子系统被调参数的动态、稳态品质指标应满足附录A中表A.1的要求。

6.2 MCS性能测试

6.2.1 最终验收测试时应由考核方根据被考核方提供的调试报告情况,确定对MCS全部重新进行测试,或只进行部分抽查测试。

6.2.2 在部分抽测的情况下,可结合CCS负荷变动试验和AGC负荷跟随试验对外扰下MCS的调节品质进行验证;必要时增加对MCS的定值扰动测试,将测试结果填入附录B的表B.3中。

6.2.3 MCS的性能测试应满足附录A的要求。

6.3 协调控制系统AGC负荷跟随试验

6.3.1 测试条件:CCS负荷变动试验验证合格;试验期间宜解除机组一次调频功能,当系统无法解除时,应采取措施避免一次调频造成的干扰;其他要求见4.2。

6.3.2 调整机组负荷到试验负荷段,稳定机组运行工况,机炉协调控制投入AGC方式;测试指令从调度中心或CCS负荷给定回路以 $1.5\%P_e/\text{min}$ (直吹式机组)或 $2.0\%P_e/\text{min}$ (中储式机组)的变化速率、负荷变动量为 $\Delta P=10\%P_e$ 的斜坡方式增加(或减少),斜坡指令到达目标值并稳定 2min后,再进行反方向的变动试验;负荷变动试验各进行 1次~3次,可选择其中一次的试验数据作为验收测试结果,填入附录B的表B.2中。

6.3.3 AGC负荷跟随试验时,CCS及各控制子系统被调参数的动态、稳态品质指标应满足附录A中表A.1的要求。

6.4 RB试验

6.4.1 新建机组最终验收测试前应进行RB动态试验,其他情况下(如对CCS的组态进行了修改)可进行RB功能模拟试验。

6.4.2 RB功能模拟试验的方法和要求见附录A中A.5.4.1RB功能模拟试验。

6.4.3 RB动态试验的方法和要求见附录A中A.5.4.2RB动态试验。

7 文档验收

7.1 最终验收测试时,应提供MCS的调试报告。报告内容应包括主辅设备概述、MCS简要说明、调整试验经过、主要修改记录、控制系统对象特性(必要时)、调整门的流量特性(必要时)、系统中主要整定值、表明调节系统品质指标的内外扰动下的过渡过程曲线、结论和存在问题等。

7.2 最终验收测试时,应提供CCS负荷变动试验报告。报告内容应包括CCS简要说明、负荷变动试验过程的描述、主要修改记录、系统中主要整定值、负荷变动试验下的过渡过程曲线、结论和存在问题等。

7.3 最终验收测试时,应提供协调控制系统AGC负荷跟随试验报告。报告内容应包括CCS的AGC功能简要说明、AGC负荷跟随试验过程的描述、主要修改记录、系统中主要整定值、AGC负荷跟随试验下的过渡过程曲线、结论和存在问题等。

7.4 最终验收测试时,应提供RB试验报告。报告内容应包括机组RB功能的简要说明、RB试验过程的描述、主要修改记录、RB试验曲线、结论和存在问题等。

7.5 新建机组在完成满负荷连续 168h(72h)试运行后,应提供 168h(72h)试运行期间MCS可用率统计运行记录;最终验收测试时,应提供机组 168h(72h)后试生产期间MCS可用率统计运行记录;MCS可用率的统计计算和考核按第8章的要求。



8 可用率考核

8.1 MCS 投入试运行起,开始考核其可用率。单元机组 MCS 的统计工作宜借助编入 DCS 的程序自动进行统计。考核统计时间:168h 试运行不得少于 7 天,72h 试运行不得少于 4 天,最终验收测试不得少于 60 天。

8.2 MCS 的“统计套数”(n_i)可按下列原则确定:有特定的被调量并由 PID(或其他)调节器形成的闭环调节回路。协调控制系统(n_i=4):AGC 方式、协调方式、锅炉跟随、汽轮机跟随。给水控制系统(n_i=2):单冲量控制、三冲量控制。其余控制系统单独统计(n_i=1):如给水控制系统的给水差压控制、最小流量再循环控制;燃烧控制系统的炉膛压力控制、送风机动叶风量控制(或二次风门风量控制)、风箱与炉膛差压控制(或二次风压控制)、氧量控制、燃料风控制、燃尽风控制、一次风压控制;制粉系统的磨煤机出口温度控制、给煤量控制、直吹式制粉系统一次风量控制、中储式制粉系统钢球磨煤机入口风压控制;过热汽温控制的各级减温水控制;再热汽温的摆动燃烧器/尾部烟道挡板控制、减温水控制;辅助设备自动控制系统的除氧器水位、除氧器压力、加热器水位、凝汽器水位、轴封压力、凝结水再循环流量控制,以及其他单回路控制系统等。

8.3 单套 MCS 的可用率 A_i 的计算公式:

$$A_i = (t_{ai}/t_t) \times 100\% \quad (1)$$

式中:

t_{ai}——被统计的第 i 套系统达到附录 A 的模拟量控制系统品质指标后累计投入自动运行的时间, h;

t_t——机组运行在该系统应投自动的负荷范围内时间, h。

8.4 MCS 的总可用率 A 的计算公式:

$$A = \left(\sum_{i=1}^n n_i A_i / N \right) \times 100\% \quad (2)$$

式中:

n_i——被统计的第 i 套系统的统计套数;

N——机组 MCS 的总套数。

MCS 可用率考核统计表见附录 C。

8.5 MCS 的总可用率 A 应满足各个阶段的验收要求。

8.5.1 满负荷连续 168h(72h)试运行:300MW 等级及以上机组 A 不少于 80%;300MW 等级以下机组 A 不少于 70%;

8.5.2 最终验收测试:300MW 等级及以上机组 A 不少于 90%;300MW 等级以下机组 A 不少于 80%。

8.6 单元机组(锅炉、汽轮机及辅助系统)宜与全厂公用辅助系统和辅助车间分别统计和考核 MCS 的可用率。

8.7 可用率统计数据填入附录 C 的表 C 中。



附录 A

(规范性附录)

模拟量控制系统品质指标

A.1 给水控制系统的验收测试

A.1.1 汽包锅炉的给水控制系统定义

由启动给水泵出口旁路调节门、电动调速给水泵和汽动调速给水泵(或者由给水泵出口调节门、定速给水泵)组成的单/三冲量给水控制系统和给水泵最小流量再循环控制系统。

A.1.2 汽包水位的测量

A.1.2.1 汽包水位信号应分别取自 3 个独立的差压变送器进行三选中值逻辑判断后的信号,并且该信号应进行必要的参数修正。

A.1.2.2 差压式水位测量装置的平衡容器设置正确。

A.1.2.3 汽水侧取样管、取样阀门,以及平衡容器等安装正确。

A.1.3 对象特性试验(必要时进行)

A.1.3.1 汽包水位动态特性试验。

给水流量扰动下汽包水位动态特性试验:保持机组负荷稳定、锅炉燃烧率不变;给水控制置手动,手操并保持在下限水位稳定运行 2min 左右;一次性快速改变给水调节门开度,使给水流量阶跃增加 15%额定流量左右;保持其扰动不变,记录试验曲线;待水位上升到上限水位附近,手操并保持在上限水位稳定运行;一次性快速改变给水调门开度,使给水流量阶跃减小 15%额定流量左右;保持其扰动不变,记录试验曲线;待水位降到下限水位附近结束试验。

重复上述试验 2 次~3 次,分析给水流量阶跃扰动下汽包水位变化的飞升特性曲线,求得其动态特性参数 ε (飞升速度)和 τ (迟延时间)。

A.1.3.2 给水调节门特性试验。

新投入使用或检修后的调节门(给水泵出口调节门、启动给水泵出口旁路调节门)应满足以下质量要求:

a) 给水泵出口调节门全开时的最大流量应满足单台给水泵最大负荷要求,并有 10%的裕量;启动给水泵出口旁路调节门全开时的最大流量应满足 30%机组负荷下的流量要求,并有 10%的裕量。

b) 调节门全关时,漏流量应小于调节门最大流量的 10%。

c) 调节门特性曲线的线性工作段应大于全行程的 70%,其回程误差不大于调节门最大流量的 3%。

d) 调节门的死行程应小于全行程的 5%。

给水调节门流量特性试验。试验前检查调整门全开时给水压力是否达到额定值,否则应通过调整提高给水压力;试验时,置给水调节于手动控制方式;在机组运行工况稳定的情况下,手动单方向间断地开大调节阀,每次以 10%幅度为宜,直至调节阀全开;然后再以同样方式关小,直至全关;每次减小或开大操作都必须待流量稳定后进行。

A.1.3.3 电动液耦调速给水泵特性试验。

新投入使用或检修后的电动液耦调速给水泵在不同转速(调速泵勺管位置开度)下的给水出口压力和给水流量关系特性应满足以下质量要求:

a) 液压联轴节的调速范围应达到 25%~100%。

b) 液压调速泵勺管位置开度和反馈电压应为线性关系,其回程误差应不大于 2%。

c) 在调速范围内,泵出口给水压力和给水流量特性应符合制造厂的技术要求。



A.1.3.4 汽动调速给水泵特性试验。

新投入使用或检修后的汽动调速给水泵在不同转速下的给水泵出口给水压力和给水流量关系特性应满足以下质量要求：

- a) 调节范围应按给水泵汽轮机确定的调速范围设定为 0~100%。
- b) 给水流量与负荷指令呈线性关系，其回程误差应不大于 2%。
- c) 在调速范围内，泵出口给水压力和给水流量特性应符合制造厂的技术要求。

A.1.3.5 给水泵最小流量再循环控制门特性试验。

新投入使用或检修后的给水泵最小流量再循环控制门应满足以下质量要求：

- a) 再循环控制流量应高于给水泵最小设计流量。
- b) 再循环阀能瞬间提升 10%~30%阀门开度(可调)。
- c) 当切除再循环流量时，再循环阀能在瞬时关闭，隔绝 10%的再循环流量。

A.1.4 给水控制系统的品质指标

a) 控制系统正常工作时，给水流量应随蒸汽流量迅速变化；在汽包水位正常时，给水流量与蒸汽流量应基本相等。

b) 稳态品质指标：300MW 等级以下机组 $\pm 20\text{mm}$ ，300MW 等级及以上机组 $\pm 25\text{mm}$ ；控制系统的执行机构不应频繁动作。

c) 水位定值扰动(扰动量为 300MW 等级以下机组 40mm，300MW 等级及以上机组 60mm)：过渡过程衰减率 $\psi=0.7\sim 0.8$ ；稳定时间为 300MW 等级以下机组小于 3min，300MW 等级及以上机组小于 5min。

d) 机组启停过程中，汽包水位控制的动态品质指标：在 30%负荷以下单冲量方式运行时，汽包水位允许动态偏差为 $\pm 80\text{mm}$ ；在 30%~70%负荷范围三冲量给水控制运行时，汽包水位允许动态偏差为 $\pm 60\text{mm}$ ；在 70%~100%负荷范围三冲量给水控制运行时，汽包水位动态品质指标见表 A.1。

e) 机炉协调控制方式下的动态、稳态品质指标见表 A.1。

A.2 汽温自动控制系统的验收测试

汽温自动控制系统包括过热蒸汽温度和再热蒸汽温度自动控制系统。

A.2.1 对象特性试验(必要时进行)

A.2.1.1 过热蒸汽温度动态特性试验。

试验内容主要包括二级减温水扰动下主蒸汽温度、二级导前汽温动态特性，一级减温水扰动下中间点温度、一级导前汽温动态特性等；试验宜分别在 70%和 100%两种负荷下进行，每一负荷下的试验宜不少于两次。

置减温控制于手动控制方式，在机组运行工况稳定的情况下，手动一次阶跃关小(开大)减温水调节阀开度，幅度以减小(开大)10%减温水流量为宜，记录主蒸汽温度变化情况，待主蒸汽温度上升(下降)并稳定在新值时结束试验。

A.2.1.2 再热蒸汽温度动态特性试验。

试验内容主要包括摆动燃烧器倾角或尾部烟道控制挡板摆动下的再热蒸汽温度动态特性、再热器减温水扰动下的再热蒸汽温度动态特性；试验宜在 70%和 100%两种负荷下进行，每一负荷下的试验宜不少于两次。

A.2.1.3 减温水调节门特性试验。

新投入使用或检修后的调节门应满足以下质量要求：

- a) 调节门的最大流量应满足锅炉最大负荷要求，并约有 10%的裕量；
- b) 调节门的漏流量应小于其最大流量的 10%；



- c) 调节门特性曲线应呈线性, 工作段应大于 70%, 其回程误差应小于最大流量的 3%;
- d) 调节门的死行程应小于全行程的 5%。

在机组运行工况稳定的情况下, 手动单方向间断地开大减温水调节阀, 每次以 10%幅度为宜, 直至调节阀全开; 然后再以同样方式关小, 直至全关; 每次减小或开大操作都必须待流量稳定后进行。

试验中, 若出现减温水流量过大可能使汽温低于允许范围时, 为了保证机组的安全, 应改为在不同运行工况按上述方法分段进行特性试验。为了防止过热汽温超越允许范围, 试验过程中应加强监视, 发现汽温越限严重或失控应立即中止试验, 并将阀门开度迅速恢复至试验前位置直至参数稳定。

A. 2. 1. 4 摆动燃烧器特性试验。

摆动燃烧器应满足以下质量要求:

- a) 热态下摆动燃烧器机械部分动作灵活, 无卡涩;
- b) 摆动燃烧器四角倾角误差范围为 $\pm 2^\circ$ 。

A. 2. 1. 5 尾部烟道控制挡板摆动特性试验。

锅炉尾部烟道控制挡板在热态下要求其机械部分动作灵活, 无卡涩。

A. 2. 2 汽温控制系统的品质指标(负荷范围 70%~100%)

a) 稳态品质指标: 过热汽温 300MW 等级以下机组为 $\pm 2^\circ\text{C}$, 300MW 等级及以上机组为 $\pm 3^\circ\text{C}$; 再热蒸汽温度 300MW 等级以下机组为 $\pm 3^\circ\text{C}$, 300MW 等级及以上机组为 $\pm 4^\circ\text{C}$; 执行器不应频繁动作。

b) 过热汽温和再热汽温给定值改变 $\pm 5^\circ\text{C}$ 时, 过渡过程衰减率 $\psi=0.75\sim 1$; 稳定时间为 300MW 等级以下机组小于 15min, 300MW 等级及以上机组小于 20min。

c) 机炉协调控制方式下的动态、稳态品质指标见表 A. 1。

A. 3 燃烧自动控制系统

A. 3. 1 燃烧自动控制系统包括内容

内容包括燃料量控制及热值(BTU)校正、风量氧量控制(送风机动叶风量控制/二次风门风量控制、风箱与炉膛差压控制/二次风压控制、氧量校正、燃料风控制、燃尽风控制)、炉膛压力控制、一次风压控制、磨煤机控制(直吹式制粉系统一次风量控制/中储式制粉系统钢球磨煤机入口风压控制、出口温度控制、给煤量控制)等自动控制系统。

A. 3. 2 对象特性试验(必要时进行)

A. 3. 2. 1 一次风门风量特性试验。

一次风门风量特性试验宜在磨煤机系统冷态通风试验中进行。手动单方向间断地开大磨煤机一次风流量调节挡板, 每次以 10%幅度为宜, 直至调节挡板全开; 然后再以同样方式关小, 直至全关; 每次减小或开大操作都必须待流量稳定后进行。

在磨煤机运行工况下, 宜选择在磨煤机启动时暖磨, 停运时清磨阶段进行; 其他情况, 可以按上述方法分段进行开度—流量的检查, 但不宜进行全程一次风流量特性试验。

A. 3. 2. 2 中储式制粉系统给煤/粉量调节特性试验。

对于中储式制粉系统, 必要时在投入前进行给煤量/给粉量调节特性试验。应满足以下要求:

- a) 给粉机最高转速下的给粉量应能满足锅炉最大负荷的要求, 并略有裕量;
- b) 在给粉机控制信号量程范围的二分之一处, 各台给粉机的转速偏差应小于 50r/min;
- c) 锅炉最大负荷下的给粉机转速与锅炉最低负荷下的给粉机转速之比值应不小于 3。

A. 3. 3 炉膛压力控制系统品质指标(负荷范围 70%~100%)

- a) 稳态品质指标: 300MW 等级以下机组为 $\pm 50\text{Pa}$, 300MW 等级及以上机组为 $\pm 100\text{Pa}$ 。
- b) 炉膛压力定值扰动(扰动量为 300MW 等级以下机组 $\pm 100\text{Pa}$, 300MW 等级及以上机组 $\pm 150\text{Pa}$): 过



过渡过程衰减率 $\psi=0.75\sim0.9$ ；稳定时间为 300MW 等级以下机组小于 40s，300MW 等级以上机组小于 1min。

c) 机炉协调控制方式下的动态、稳态品质指标见表 A.1。

A.3.4 风量氧量控制系统品质指标(负荷范围 70%~100%)

a) 氧量稳态品质指标： $\pm 1\%$ 。

b) 燃烧率指令增加时，风量应能在 30s 内变化，氧量应能在 1min 内变化。

c) 风压/差压定值扰动(扰动量：300MW 等级以下机组 $\pm 100\text{Pa}$ 、300MW 等级及以上机组 $\pm 150\text{Pa}$)：

过渡过程衰减率 $\psi=0.75\sim0.9$ ；稳定时间为 300MW 等级以下机组小于 30s，300MW 等级以上机组小于 50s。

A.3.5 一次风压控制系统品质指标(负荷范围 70%~100%)

a) 稳态品质指标： $\pm 100\text{Pa}$ 。

b) 一次风压给定值改变 300Pa 时，过渡过程衰减率 $\psi=0.75\sim 1$ ；稳定时间为 300MW 等级以下机组小于 30s，300MW 等级以上机组小于 50s。

A.3.6 直吹式制粉系统磨煤机控制系统品质指标(负荷范围 70%~100%)

a) 稳态品质指标：磨煤机入口一次风流量为 $\pm 5\%$ ；磨煤机出口温度为 $\pm 3^{\circ}\text{C}$ 。

b) 一次风量给定值改变 5%时，过渡过程衰减率 $\psi=0.75\sim 0.9$ ，稳定时间小于 20s。

c) 磨煤机出口温度给定值改变 3°C 时，过渡过程衰减率 $\psi=0.75\sim 0.9$ ，稳定时间小于 5min。

d) 高温风(或低温风)挡板开度改变 10%时，控制系统应能在 3min 内消除扰动，磨煤机出口温度最大偏差应不大于 5°C 。

中储式制粉系统也可参照本条要求。

A.3.7 钢球磨煤机入口风压控制系统(中储式制粉系统)品质指标

a) 稳态品质指标： $\pm 40\text{Pa}$ 。

b) 磨煤机入口风压给定值改变 50Pa 时，过渡过程衰减率 $\psi=0.75\sim 0.9$ ，稳定时间小于 20s。

c) 磨煤机入口高、低温风挡板开度改变 10%时，控制系统应能在 30s 内消除扰动。

A.4 辅助设备控制系统的验收测试

A.4.1 辅助设备自动控制系统包括内容

内容包括除氧器水位、压力、加热器水位、凝汽器水位、其他辅助设备自动控制系统。其中其他辅助设备自动控制系统主要有以下单回路自动控制系统：空气预热器冷端温度控制、凝结水再循环流量控制、燃油压力控制、辅助蒸汽温度控制、暖风器疏水箱水位控制、密封风滤网差压控制、闭式水压力控制、闭式水温度控制、闭式水膨胀水箱水位控制、汽轮机润滑油温控制、发电机定冷水温度控制、发电机氢温控制、发电机密封油温控制、电泵工作油温控制、汽泵润滑油温控制等自动控制系统等。

A.4.2 除氧器水位控制系统品质指标(负荷范围 70%~100%)

a) 稳态品质指标： $\pm 20\text{mm}$ 。

b) 当水位给定值改变 100mm 时，过渡过程衰减率 $\psi=0.7\sim 0.8$ ；稳定时间为 300MW 等级以下机组小于 10min，300MW 等级及以上机组小于 20min。

A.4.3 除氧器压力控制系统品质指标(负荷范围 70%~100%)

a) 稳态品质指标： $\pm 20\text{kPa}$ 。

b) 当除氧器压力给定值改变 50kPa 时，控制系统应在 1min 内将压力稳定在新的给定值，过渡过程衰减率 $\psi=0.75\sim 1$ 。

A.4.4 加热器水位控制系统品质指标(负荷范围 70%~100%)

a) 稳态品质指标： $\pm 20\text{mm}$ (立式)， $\pm 10\text{mm}$ (卧式)。



b) 定值扰动(立式 50mm、卧式 30mm)时, 过渡过程衰减率 $\psi=0.75\sim 1$ 。

A. 4. 5 凝汽器水位控制系统品质指标(负荷范围 70%~100%)

a) 稳态品质指标: $\pm 20\text{mm}$ 。

b) 凝汽器水位给定值改变 50mm 时, 上升方向过渡过程衰减率 $\psi=0.75\sim 1$; 稳定时间为 300MW 等级以下机组小于 5min, 300MW 等级以上机组小于 8min。

A. 4. 6 其他辅助设备自动控制系统品质指标(负荷范围 70%~100%)

a) 稳态品质指标: 给定值附近, 不振荡。

b) 定值扰动时, 控制系统衰减率 $\psi=0.75\sim 1$ 。

A. 5 CCS 的验收测试

A. 5. 1 CCS 包括内容

内容包括机组负荷指令设定、汽炉主控、压力设定、频率校正、RB 等控制回路。

A. 5. 2 对象特性试验及质量要求

A. 5. 2. 1 负荷动态响应特性(必要时进行)。

机组负荷对汽轮机调门的响应特性试验: 保持锅炉燃烧率(燃料量和风量)不变, 阶跃(快速)改变汽轮机调门开度, 记录负荷和主蒸汽压力的变化。

机组负荷对燃烧率的响应特性试验应包括定压和滑压两种运行方式。定压运行方式负荷动态响应特性试验宜分别在 60%、90%负荷段进行, 为了保持主蒸汽压力不变应投入主蒸汽压力自动; 滑压运行方式负荷动态响应特性试验宜在 70%~80%负荷段进行, 置汽轮机调门为手动, 保持其开度不变。分别按上述要求进行锅炉燃烧率阶跃扰动, 记录试验曲线。

A. 5. 3 CCS 的品质指标

A. 5. 3. 1 负荷变动试验。

在机炉协调控制方式下, 在 70%~100%负荷范围内负荷指令以直吹式机组 $2\%P_e/\text{min}$ 或 $3\%P_e/\text{min}$ 的变化速率、中储式机组 $3\%P_e/\text{min}$ 或 $4\%P_e/\text{min}$ 的变化速率、负荷变动量为 $\Delta P=15\%P_e$ 分别进行负荷单向变动试验; 机组各主要被调参数的动态、稳态品质指标见表 A. 1。

A. 5. 3. 2 AGC 负荷跟随试验。

在 AGC 控制方式下, 在 70%~100%负荷范围内负荷指令以 $1.5\%P_e/\text{min}$ (直吹式机组)或 $2.0\%P_e/\text{min}$ (中储式机组)的变化速率、负荷变动量为 $\Delta P=10\%P_e$ 的斜坡方式连续增、减(或减、增)各一次的双向变动试验; 机组各主要被调参数的动态、稳态品质指标见表 A. 1。



表 A.1 机组各主要被调参数的动态、稳态品质指标

| 参数 | 负荷变动试验动态品质指标 | | | | | | AGC 负荷跟随试验动态品质指标 | | 稳态品质指标 | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------------|------------|--------------|---------------|
| | 直吹式机组 | | | 中储式机组 | | | 直吹式机组 | 中储式机组 | 300MW 等级以下机组 | 300MW 等级及以上机组 |
| | ① | ② | ③ | ④ | ⑤ | ⑥ | | | | |
| 负荷指令变化速率 % P_e /min | 2 | 2 | 3 | 3 | 3 | 4 | 1.5 | 2.0 | — | — |
| 实际负荷变化速率 % P_e /min | ≥ 1.5 | ≥ 1.5 | ≥ 2.2 | ≥ 2.5 | ≥ 2.5 | ≥ 3.2 | ≥ 1.0 | ≥ 1.5 | — | — |
| 负荷响应纯 迟延时间 s | 120 | 90 | 90 | 60 | 40 | 40 | 90 | 40 | — | — |
| 负荷偏差 % P_e | ± 3 | ± 3 | ± 3 | ± 3 | ± 3 | ± 3 | ± 5 | ± 5 | ± 1.5 | ± 1.5 |
| 主蒸汽压力 MPa | ± 0.6 | ± 0.5 | ± 0.5 | ± 0.5 | ± 0.5 | ± 0.5 | ± 0.6 | ± 0.5 | ± 0.2 | ± 0.3 |
| 主蒸汽温度 ℃ | ± 10 | ± 8 | ± 8 | ± 10 | ± 8 | ± 8 | ± 10 | ± 10 | ± 2 | ± 3 |
| 再热蒸汽温度 ℃ | ± 12 | ± 10 | ± 10 | ± 12 | ± 10 | ± 10 | ± 12 | ± 12 | ± 3 | ± 4 |
| 汽包水位 mm | ± 60 | ± 40 | ± 40 | ± 60 | ± 40 | ± 40 | ± 60 | ± 60 | ± 20 | ± 25 |
| 炉膛压力 Pa | ± 200 | ± 150 | ± 150 | ± 200 | ± 150 | ± 150 | ± 200 | ± 200 | ± 50 | ± 100 |
| 烟气含氧量 % | — | — | — | — | — | — | — | — | ± 1 | ± 1 |
| 注 1: 600MW 等级直吹式机组: 指标①为合格指标, 指标②为优良指标。 注 2: 600MW 等级以下直吹式机组: 指标②为合格指标, 指标③为优良指标。 注 3: 300MW 等级及以上中储式机组: 指标④为合格指标, 指标⑤为优良指标。 注 4: 300MW 等级以下中储式机组: 指标⑤为合格指标, 指标⑥为优良指标 | | | | | | | | | | |

A.5.4 RB 试验

A.5.4.1 RB 功能模拟试验。

A.5.4.1.1 在机组停运的情况下, 按设计的功能依次模拟 RB 产生的条件, 进行 RB 功能模拟试验。

A.5.4.1.2 试验中, 主要应检查以下内容:

- 不同原因的 RB 发生时, DI 通道应正确动作;
- 负荷运算回路、负荷指令变化速率等 RB 控制参数已正确设定;
- CCS 输出至 FSSS 的 DO 通道应正确动作;
- FSSS 跳磨煤机或给粉机的控制逻辑正确, 满足 DL/T 655 的要求;
- CCS 应切换到汽轮机跟随(TF)方式运行;
- RB 时, 主蒸汽压力采用的定压/降压方式符合设计要求, 一般应切换到降压方式运行;
- 降压运行方式时, 降压的速率参数设定应根据不同 RB 的特点正确设定。

A.5.4.2 RB 动态试验。

A.5.4.2.1 进行 RB 动态试验应具备以下条件:

- CCS 及控制子系统已正常投用, 并完成相应的定值扰动和负荷变动试验, 调节品质合格。
- CCS 在 TF 方式下的定值扰动试验已完成, 调节品质符合要求。参考指标: 在 0.6MPa~0.8MPa 定值扰动下, 过渡过程衰减率 $\psi=0.7\sim 0.9$, 稳定时间小于 6min。



c) RB 功能模拟试验已完成，其结果满足要求。

d) 机组保护系统已正常投入。

A. 5. 4. 2. 2 在进行正式的 RB 动态试验之前，宜进行预备性试验，以确认 CCS 在 RB 工况下能正确进行控制，并调整不同 RB 工况下的目标负荷、降负荷速率的设置。

A. 5. 4. 2. 3 在 90% P_0 以上负荷工况下进行RB正式试验，以考核机组和CCS在RB工况下的控制能力。按设计的RB功能分项进行动态试验，如分别进行磨煤机、送风机、引风机、一次风机、炉水循环泵、给水泵等RB试验，记录各被调量的动态曲线。

A. 5. 4. 3 RB 试验的品质指标。

a) 机组进行 RB 功能分项试验时，不需要人工干预，其参数波动范围不危及机组安全和不引起机组保护动作跳闸，即认为该项 RB 试验合格。

b) RB 试验项目宜按设计的功能全部进行，也可按用户要求根据现场条件选择部分项目，但 RB 功能模拟试验应全部进行。

注：本附录所列的内容是当进行这些模拟量控制系统项目验收测试时应达到的品质指标及相应方法，不表明验收测试时必须完成所有这此具体项目。



附 录 B

(规范性附录)

模拟量控制系统验收测试项目及测试结果

B.1 机炉协调系统功能测试结果见表 B.1。

表 B.1 机炉协调系统功能测试结果汇总表

| 测 试 项 目 | | 功能测试正常的 被抽查系统或回路 | 功能测试有缺陷的 被抽查系统或回路 |
|--------------|-----------------|---------------------|----------------------|
| 控制方式 无扰切换 | AGC 远方/就地 | | |
| | 协调/锅炉跟随/汽轮机跟随 | | |
| | 控制系统手/自动 | | |
| | 给水控制系统单/三冲量 | | |
| | 其他无扰切换 | | |
| 偏差报警 | 测量信号偏差报警 | | |
| | 执行器偏差报警 | | |
| | 调节器偏差报警 | | |
| | 其他偏差报警 | | |
| 方向性 闭锁保护 | 协调控制系统负荷指令增/减闭锁 | | |
| | 炉膛压力高/低 | | |
| | 送引风机动叶调节开/关闭锁 | | |
| | 燃料量和风量交叉限制 | | |
| | 其他方向性闭锁 | | |
| 超驰控制保护 | CCS 负荷指令迫增/迫降 | | |
| | 炉膛压力防内爆超驰保护控制 | | |
| | 机组启停时磨煤机超驰控制 | | |
| | 其他超驰控制保护功能 | | |

表 B.2 机炉协调系统性能测试结果

| 参数 | | 负荷变动试验 动态品质指标 | | | | | | AGC 负荷跟 随试验动态 品质指标 | | 稳态品质指标 | | 辅机故障减 负荷(RB) 偏差 ($\Delta P=50\%P_e$) |
|------------------------------------|-----|------------------|------------|------------|------------|------------|------------|--------------------------|------------|---------------------|--------------------------|-------------------------------------------------|
| | | 直吹式机组 | | | 中储式机组 | | | 直吹式机 组 | 中储式机 组 | 300MW 等级以 下机组 | 300MW 等级及 以上机 组 | |
| | | ① | ② | ③ | ④ | ⑤ | ⑥ | | | | | |
| 负荷指令变化速率 $\%P_e/\text{min}$ | | 2 | 2 | 3 | 3 | 3 | 4 | 1.5 | 2.0 | | | |
| 实际负荷 变化速率 $\%P_e/\text{min}$ | 允许值 | ≥ 1.5 | ≥ 1.5 | ≥ 2.2 | ≥ 2.5 | ≥ 2.5 | ≥ 3.2 | ≥ 1.0 | ≥ 1.5 | — | — | — |
| | 实测值 | | | | | | | | | | | |
| 负荷响应纯 迟延时间 s | 允许值 | 120 | 90 | 90 | 60 | 40 | 40 | 90 | 40 | — | — | — |
| | 实测值 | | | | | | | | | | | |
| 负荷偏差 $\%P_e$ | 允许值 | ± 3 | ± 3 | ± 3 | ± 3 | ± 3 | ± 3 | ± 5 | ± 5 | ± 1.5 | ± 1.5 | — |
| | 实测值 | | | | | | | | | | | |
| 主蒸汽压力 MPa | 允许值 | ± 0.6 | ± 0.5 | ± 0.5 | ± 0.5 | ± 0.5 | ± 0.5 | ± 0.6 | ± 0.5 | ± 0.2 | ± 0.3 | — |
| | 实测值 | | | | | | | | | | | |
| 主蒸汽温度 $^{\circ}\text{C}$ | 允许值 | ± 10 | ± 8 | ± 8 | ± 10 | ± 8 | ± 8 | ± 10 | ± 10 | ± 2 | ± 3 | — |
| | 实测值 | | | | | | | | | | | |
| 再热蒸汽温度 $^{\circ}\text{C}$ | 允许值 | ± 12 | ± 10 | ± 10 | ± 12 | ± 10 | ± 10 | ± 12 | ± 12 | ± 3 | ± 4 | — |
| | 实测值 | | | | | | | | | | | |
| 汽包水位 mm | 允许值 | ± 60 | ± 40 | ± 40 | ± 60 | ± 40 | ± 40 | ± 60 | ± 60 | ± 20 | ± 25 | — |
| | 实测值 | | | | | | | | | | | |
| 炉膛压力 Pa | 允许值 | ± 200 | ± 150 | ± 150 | ± 200 | ± 150 | ± 150 | ± 200 | ± 200 | ± 50 | ± 100 | — |
| | 实测值 | | | | | | | | | | | |
| 烟气含氧量 $\%$ | 允许值 | — | — | — | — | — | — | — | — | ± 1 | ± 1 | — |
| | 实测值 | | | | | | | | | | | |

注 1: 600MW 等级直吹式机组: 指标①为合格指标, 指标②为优良指标。
注 2: 600MW 等级以下直吹式机组: 指标②为合格指标, 指标③为优良指标。
注 3: 300MW 等级及以上中储式机组: 指标④为合格指标, 指标⑤为优良指标。
注 4: 300MW 等级以下中储式机组: 指标⑤为合格指标, 指标⑥为优良指标。



B.3 控制子系统性能测试结果见表 B.3。

表 B.3 控制子系统性能测试结果

| 控制系统 | 被调量 | 机组类型 | 扰动量 | 动态最大偏差 (最大超调量) | | 稳定时间 | | 衰减率 ψ | |
|----------------------------------|----------------|-----------------|-------------------------|-------------------------|-----|---------|-----|------------|-----|
| | | | | 允许值 | 实测值 | 允许值 | 实测值 | 允许值 | 实测值 |
| 给水控制系统 | 汽包水位 | 300MW 等级 以下 | 40mm | <15mm | | <3 min | | 0.7~0.8 | |
| | | 300MW 等级 及以上 | 60mm | <25mm | | <5 min | | 0.7~0.8 | |
| 主蒸汽温度控制系统 | 主蒸汽温度 | 300MW 等级 以下 | $\pm 5^{\circ}\text{C}$ | <1 $^{\circ}\text{C}$ | | <15 min | | 0.75~1 | |
| | | 300MW 等级 及以上 | $\pm 5^{\circ}\text{C}$ | <1 $^{\circ}\text{C}$ | | <20 min | | 0.75~1 | |
| 再热蒸汽温度控制系统 | 再热蒸汽温度 | 300MW 等级 以下 | $\pm 5^{\circ}\text{C}$ | <1 $^{\circ}\text{C}$ | | <15 min | | 0.75~1 | |
| | | 300MW 等级 及以上 | $\pm 5^{\circ}\text{C}$ | <1 $^{\circ}\text{C}$ | | <20 min | | 0.75~1 | |
| 炉膛负压控制系统 | 炉膛压力 | 300MW 等级 以下 | $\pm 100\text{ Pa}$ | <20Pa | | <40s | | 0.75~0.9 | |
| | | 300MW 等级 及以上 | $\pm 150\text{ Pa}$ | <30Pa | | <1min | | 0.75~0.9 | |
| 风量控制系统 | 风压/差压 | 300MW 等级 以下 | $\pm 100\text{ Pa}$ | <20Pa | | <30s | | 0.75~0.9 | |
| | | 300MW 等级 及以上 | $\pm 150\text{ Pa}$ | <30Pa | | <50s | | 0.75~0.9 | |
| 一次风压控制系统 | 一次风压力 | 300MW 等级 以下 | $\pm 300\text{ Pa}$ | <60Pa | | <30s | | 0.75~1 | |
| | | 300MW 等级 及以上 | $\pm 300\text{ Pa}$ | <60Pa | | <50s | | 0.75~1 | |
| 磨煤机一次 风量控制系统 | 磨煤机入口 一次风流量 | — | $\pm 5\%$ | <1% | | <20s | | 0.75~0.9 | |
| 磨煤机出口 温度控制系统 | 磨煤机出口 温度 | — | $\pm 3^{\circ}\text{C}$ | <0.6 $^{\circ}\text{C}$ | | <5min | | 0.75~0.9 | |
| 磨煤机入口风 压控制系统 (中储式 制粉系统) | 磨煤机入口 风压 | — | $\pm 50\text{ Pa}$ | <10Pa | | <20s | | 0.75~0.9 | |



附 录 C
(规范性附录)
模拟量控制系统投运情况一览表

单元机组(或全厂公用辅助系统)模拟量控制系统投运情况见表 C.1。

表 C.1 单元机组(或全厂公用辅助系统)模拟量控制系统投运情况一览表

| 序 号 | 系统 名称 | 年 月 | | 年 月 | | 年 月 | | 单个系统 可用率 |
|-----|----------|---------------------|------------------|---------------------|------------------|---------------------|------------------|-------------|
| | | 机组运行时间： | | 机组运行时间： | | 机组运行时间： | | |
| | | 自动投运 时间 t_{ai} | 自动应投 时间 t_t | 自动投运 时间 t_{ai} | 自动应投 时间 t_t | 自动投运 时间 t_{ai} | 自动应投 时间 t_t | |
| 1 | | | | | | | | |
| 2 | | | | | | | | |
| 3 | | | | | | | | |
| 4 | | | | | | | | |
| 5 | | | | | | | | |
| 6 | | | | | | | | |
| 7 | | | | | | | | |
| 8 | | | | | | | | |
| 9 | | | | | | | | |
| 10 | | | | | | | | |
| 11 | | | | | | | | |
| 12 | | | | | | | | |
| 13 | | | | | | | | |
| 14 | | | | | | | | |
| 15 | | | | | | | | |
| 16 | | | | | | | | |
| 17 | | | | | | | | |
| 18 | | | | | | | | |
| 19 | | | | | | | | |
| 20 | | | | | | | | |
| 21 | | | | | | | | |

总系统可用率: A= %