

E54

备案号: 6791—2000

## 中华人民共和国电力行业标准

DL/T 711—1999

### 汽轮机调节控制系统试验导则

Test guide of steam turbine governing system

2000—02—24 发布

2000—07—01 实施

|   |                                  |    |
|---|----------------------------------|----|
| 1 | 范围.....                          | 2  |
| 2 | 引用标准.....                        | 2  |
| 3 | 术语、符号、定义和单位.....                 | 2  |
| 4 | 技术规范和要求.....                     | 5  |
| 5 | 试验准备.....                        | 7  |
| 6 | 保安系统试验.....                      | 8  |
| 7 | 调节系统静态特性试验.....                  | 11 |
| 8 | 调节系统动态特性试验.....                  | 14 |
| 9 | 编写试验报告.....                      | 21 |
|   | 附录A(标准的附录)汽轮机调节控制系统方框图.....      | 21 |
|   | 附录B(标准的附录)测功法甩负荷试验结果的修正方法.....   | 21 |
|   | 附录C(标准的附录)调节系统空负荷试验改变转速的方法.....  | 22 |
|   | 附录D(提示的附录)国产典型机组动态参数.....        | 22 |
|   | 附录E(提示的附录)常规法与测功法甩负荷试验方法的特点..... | 23 |

中华人民共和国国家经济贸易委员会 发布

## 前 言

本导则是根据原电力工业部下达的 1998 年电力行业标准计划项目(综科教 [1998] 28 号文)的安排制定的。

该导则规定了汽轮机调节控制系统的性能标准,提出了统一的静态、动态和保安系统的试验方法,以及对试验仪器、仪表的要求。为电站驱动发电机的汽轮机机械型、液压型、

电液型调节控制系统的调整试验、验收试验和考核试验的标准和方法提供依据。

导则中的规定与要求，根据我国的国情，综合了国内外有关标准，力求与国际标准接轨。调节控制系统的基本术语、专业术语和技术规范，参照了 IEC 标准。试验方法以我国有关规程的规定为基础进行编制，增加了试验项目，使导则内容更加规范化、标准化和实用化。

本导则的附录 A、附录 B、附录 C 都是标准的附录。

本导则的附录 D、附录 E 都是提示的附录。

本导则归口单位：电力行业电站汽轮机标准化技术委员会。

本导则起草单位：国家电力公司热工研究院。

本导则主要起草人：房德明。

本导则由电力行业电站汽轮机标准化技术委员会负责解释。

## 中华人民共和国电力行业标准

### 汽轮机调节控制系统试验导则

DL/T 711—1999

Test guide of steam turbine governing system

#### 1 范围

本标准规定了汽轮机调节控制系统的性能标准和试验方法。本标准适用于电站中驱动发电机的汽轮机机械型、液压型、电液型调节系统的调整试验、验收试验和考核试验。其他类型汽轮机的调节控制系统也可以参照执行。

#### 2 引用标准

下列标准所包含的条文，通过在本标准中引用而构成为本标准的条文。在标准出版时，所示版本均为有效。所有标准都会被修订，使用本标准的各方应探讨使用下列标准最新版本的可能性。

GB/T2900.46—1983 电工名词术语 汽轮机及附属装置

DL5011—1992 电力建设施工及验收技术规范 汽轮机组篇

JB37—1990 汽轮机调节系统技术条件

JB1273—1986 汽轮机控制系统性能试验规程

IEC 1064 First edition 1991—04 Acceptance tests for steam turbine speed control systems

#### 3 术语、符号、定义和单位

- 3.1 在本标准中未列入的术语，均应符合国家标准 GB/T2900.46—1983 的规定。
- 3.2 基本名称、符号和单位列于表 1。
- 3.3 专业名称、定义列于表 2。

表 1 基本名称、符号和单位

| 序号 | 基本名称  | 符号       | 单位       |
|----|---|----------|----------|
| 1  | 功率或负荷 power or load                         | $P$      | MW、kW    |
| 2  | 转速 rotational speed                         | $n$      | r/min、Hz |
| 3  | 角速度 angular speed                           | $\omega$ | 1/s      |
| 4  | 压力 pressure                                 | $p$      | MPa、kPa  |
| 5  | 温度 temperature                              | $\theta$ | °C、K     |
| 6  | 电压 voltage                                  | $U$      | V        |
| 7  | 电流 current                                  | $I$      | A        |
| 8  | 油动机位移或行程 position or stroke of servo-motors | $S$      | mm、rad   |
| 9  | 调节部套位移或行程 position or stroke of pilots      | $X$      | mm、rad   |
| 10 | 阀门位移或行程 position or stroke of valves        | $h$      | mm、rad   |
| 11 | 时间常数、部件特征时间 characteristic time or element  | $T$      | s        |
| 12 | 独立变量时间 time as independent variable         | $t$      | s        |
| 13 | 转速或负荷的设定值 speed or load setting point       | $y$      | %或其他     |

注：符号标注见附录 A

表 2 专业名称、符号、定义和单位

| 序号 | 专业名称  | 符号         | 定义   | 单位       |
|----|---|------------|--|----------|
| 1  | 额定功率 rated power                                | $P_0$      | 制造厂给定的汽轮机输出功率，机组在规定的终端参数，且不超过规定的寿命条件下无限期地运行，调节汽阀不一定全部开启。额定功率也称额定出力或额定负荷(调节控制系统试验时的额定负荷是在设计背压下的考核工况)。 | MW 或 kW  |
| 2  | 最大容量 maximum capability                         | $P_{\max}$ | 在规定的终端参数下，调节汽阀全部开启，汽轮机能输出的最大功率，也称阀门全开容量和最大负荷。  | MW 或 kW  |
| 3  | 最大过负荷容量 maximum overload capability             | $P_H$      | 调节汽阀全开，在过负荷时规定的终端参数(如最终给水加热器旁路或提高新蒸汽压力)下，汽轮机能输出的最大功率   | MW 或 kW  |
| 4  | 额定转速 rated speed                                | $N_0$      | 规定汽轮机在额定负荷下的汽轮机工作转速  | Hz、r/min |
| 5  | 空负荷时的最低控制转速 minimum controlled speed at no-load | $n_i$      | 在空负荷时对应于同步器(转速给定值)下限时的转速   | Hz、r/min |
| 6  | 空负荷时的最高控制转速 maximum controlled speed at no      | $n_H$      | 在空负荷时对应于同步器(转速给定值)上限时的转速   | Hz、r/min |

|   |                                |                   |  |          |
|---|--------------------------------|-------------------|--|----------|
|   | load                           |                   |  |          |
| 7 | 瞬时飞升转速<br>temporary speed rise | $\Delta n_{\max}$ | 汽轮机在调节系统控制下甩负荷后, 转速的瞬时最大升高值。若在额定转速甩去额定负荷时, 为额定瞬时飞升转速 | Hz、r/min |

表 2 (续)

| 序号 | 专业名称   | 符 号                 | 定 义  | 单 位        |
|----|--|---------------------|--|------------|
| 8  | 瞬时最高转速<br>maximum transient speed  | $n_{\max}$          | 汽轮发电机组甩负荷后, 汽轮机在调节系统控制下的瞬时最高转速。若在额定转速甩去额定负荷时, 为额定瞬时最高转速; 若在额定转速甩去最大负荷时, 为最大瞬时最高转速      | Hz、r/min   |
| 9  | 危急超速飞升转速<br>temporary overspeed rise   | $\Delta n_{W,\max}$ | 汽轮机在调节系统失控的条件下甩负荷后, 汽轮机转速的最大升高值。若在额定转速甩去额定负荷时, 为额定危急超速飞升转速                             | Hz、r/min   |
| 10 | 危急超速最高转速<br>maximum transient overspeed  | $n_{W,\max}$        | 汽轮发电机组甩负荷之后, 汽轮机在调节系统失控条件下的最高转速。若在额定转速甩去额定负荷时, 为额定危急超速最高转速; 若在额定转速甩去最大负荷时, 为最大危急超速最高转速 | Hz、r/min   |
| 11 | 危急保安器设定转速<br>overspeed trip setting  | $n_w$               | 危急保安器脱扣动作转速  | Hz、r/min   |
| 12 | 转速不等率<br>steady-state speed regulation (speed governing droop)                 | $\delta$            | 调节系统给定值不变, 机组负荷由零至额定值, 对应的转速变化, 以额定转速的百分率表示  | %<br>(无量纲) |
| 13 | 局部转速不等率<br>steady-state incremental speed regulation (incremental speed droop) | $\delta_j$          | 假定没有迟缓率, 在某一给定的稳态转速和负荷下, 稳态转速相对于负荷的变化率。该值为调节系统静态特性转速-负荷曲线上在给定负荷处的斜率                    | %<br>(无量纲) |
| 14 | 调节系统迟缓率<br>dead band of the speed governing system                             | $\varepsilon$       | 不会引起调节汽阀位置改变的稳态转速变化的总值, 以额定转速的百分率表示  | %<br>(无量纲) |
| 15 | 调节系统稳定性<br>stability of the speed governing system                             |                     | 调节系统通过其控制作用, 来衰减转速或负荷振荡到在接受范围内的能力  |            |
| 16 | 蒸汽流量指令<br>steam flow demand  | $d_c$               | 在汽轮机调节系统中, 发出的表征汽轮机所需要的蒸汽流量信号  | MPa、V、A    |
| 17 | 流体压力 (油压)<br>fluid pressure in control system                                  | $p_c$               | 控制系统和润滑系统中的流体工质(抗燃油或透平油)压力   | MPa、kPa    |
| 18 | 负荷最大偏差或  |                     | 在控制装置规定的环境和动力源条件下运行时, 转  | %          |

|    |   |  |   |            |
|----|---|--|---|------------|
|    | 非线性 maximum load deviations or nonlinearity |  | 速 负荷曲线与相应于总不等率直线相比的负荷最大偏差, 以额定负荷的百分率表示  | (无量纲)      |
| 19 | 短期稳定性 short term stability                  |  | 环境条件在规定的范围内, 设定值、参数和转速不变, 在任何 30min 的时间间隔内, 以额定负荷的百分率表示的负荷变化                                | %<br>(无量纲) |
| 20 | 长期稳定性 long term stability                   |  | 设定值、参数和转速不变的情况下, 在 12 个月中的两次 30min 时间间隔内, 以额定负荷百分率表示的平均负荷变化。在这两次试验间隔中环境条件应在要求范围内, 但并不要求精确一致 | %<br>(无量纲) |

#### 4 技术规范和要求

##### 4.1 调节系统转速不等率 $\delta$

调节系统转速不等率  $\delta$  为 3%~6%, 一般取 4%~5%。背压式汽轮机一般为 4.5%~6.5%, 用式(1)计算:

$$\delta = (n_1 - n_2) / n_0 \times 100\% \quad (1)$$

式中:  $n_1$ ——油动机在空负荷位置  $S_0$  对应的转速, r/min;

$n_2$ ——油动机在额定负荷位置  $S_N$  对应的转速, r/min。

##### 4.2 调节系统局部转速不等率 $\delta_j$

调节系统局部转速不等率列于表 3, 用式(2)计算。

表 3 局部转速不等率

| 机组功率范围                  | 机械、液压型调节系统                             | 电液型调节系统 |
|-------------------------|--|---------|
| 0%~90%                  | 最大值无限制; 最小值不应小于系统转速不等率的 0.4 倍          | 3%~8%   |
| 90%~100%                | 最大值无限制; 最小值不应小于系统转速不等率的 0.4 倍          | 不大于 12% |
| 90%~100%<br>(平均局部转速不等率) | 不大于 15; 最大值不应大于系统转速不等率的 3 倍(除最后一只调节阀外) | 不大于 10% |

$$\delta_j = (\Delta n / \Delta P)(P_0 / n_0) \times 100\% \quad (2)$$

式中:  $\Delta n$ ——在某一给定负荷下的转速变化, r/min;

$\Delta P$ ——在某一给定负荷下转速变化引起的负荷变化, MW。

##### 4.3 调节系统迟缓率 $\varepsilon$

调节系统迟缓率列于表 4, 用式(3)计算。

表 4 迟 缓 率

| 机组额定功率 MW       | 机械、液压型调节系统 | 电液型调节系统    |
|-----------------|------------|------------|
| $\leq 100$      | $< 0.4\%$  | $< 0.15\%$ |
| 100~200(包括 200) | $< 0.2\%$  | $< 0.10\%$ |
| $> 200$         | $< 0.1\%$  | $< 0.06\%$ |

$$\varepsilon = (\Delta n / n_0) \times 100\% \quad (3)$$

式中:  $\Delta n$ ——在同一油动机位置(或负荷)下的转速差, r/min。

##### 4.4 压力不等率 $\delta_p$

当用户无特殊要求时, 可调整抽汽式汽轮机或背压式汽轮机的压力不等率列于表 5, 用式(4) 计算。可调整抽汽式汽轮机当热负荷在最大范围内变化时, 电负荷的变化一般不大

于 20%额定负荷。

表 5 压力不等率和迟缓率

| 背 压<br>MPa  | 抽汽压力<br>MPa  | 压力不等率       | 压力迟缓率      |
|-------------|--------------|-------------|------------|
| $\geq 0.98$ | $\geq 0.784$ | $\leq 10\%$ | $\leq 1\%$ |
| $\leq 0.98$ | $\leq 0.784$ | $\leq 20\%$ | $\leq 2\%$ |

$$\delta_p = (\Delta p / p_0) \times 100\% \quad (4)$$

式中： $\Delta p$ ——最大流量变化对应的抽汽压力或背压变化，MPa；

$p_0$ ——额定流量下的抽汽压力或背压，MPa。

#### 4.5 同步器(转速、负荷给定)

4.5.1 同步器工作范围：空负荷时同步器下限的最低控制转速应比额定转速低 6%，空负荷时的同步器上限最高控制转速应比额定转速高 6%。

4.5.2 在额定转速下，同步器行程由空负荷至满负荷位移所需要的时间，一般不超过 50s。

4.5.3 电液调节系统同步器(功率给定)应能逐步调整负荷，每步不大于额定负荷的 0.5%。

#### 4.6 瞬时最高转速 $n_{\max}$

汽轮发电机组甩负荷之后，汽轮机在调节系统控制下，其瞬时最高转速 $n_{\max}$ 不应使危急保安器动作。其转速的动差与静差之比 $\beta$ 应小于 1.5~2(具有功率给定自动回零的电液调节系统除外)，用式(5)计算。

$$\beta = (n_{\max} - n_0) / (n_s - n_0) < (1.5 \sim 2) \quad (5)$$

式中： $n_s$ ——甩负荷后的稳定转速，r/min。

#### 4.7 危急超速最高转速 $n_{W,\max}$

汽轮发电机组甩负荷之后，在汽轮机调节系统失控的情况下，其危急超速最高转速 $n_{W,\max}$ ，最高不得大于额定转速的 18%。汽轮机转子应在制造厂内进行超速试验，试验转速应超过危急超速最大计算转速的 2%，当转速仅受危急保安器限制时，试验转速最高不得超过额定转速的 20%。

#### 4.8 危急保安系统

4.8.1 危急保安器脱扣动作机组跳闸，脱扣动作设定转速为额定转速的 110%±1%。复位转速应高于额定转速。

4.8.2 超速限制保护动作关闭调节汽阀，不引起机组跳闸，动作整定转速一般为额定转速的 3%~5%。

4.8.3 附加超速保护动作机组跳闸，动作转速应比危急保安器动作转速高 1%~2%，最高不得大于额定转速的 114%。

#### 4.9 稳定性

4.9.1 汽轮发电机组在单机孤立电网中运行，由调节系统引起的转速波动，不应大于下述值：

$$\Delta n < 1.1 \varepsilon n_0 \quad \text{r/min} \quad (6)$$

4.9.2 汽轮发电机组在电网中运行，由调节系统引起的功率波动，不应大于下述值：

$$\Delta P / P_0 < 1.1 (\varepsilon / \delta_j) \times 100\% \quad (7)$$

#### 4.9.3 电液调节系统非线性和稳定性

电液调节系统非线性和稳定性的参考值列于表 6。

表 6 电液调节系统的非线性和稳定性

| 机组额定功率<br>MW | 非线性 | 短期稳定性 | 长期稳定性 |
|--------------|-----|-------|-------|
|--------------|-----|-------|-------|

|                 |                       |       |      |
|-----------------|-----------------------|-------|------|
| ≤100            |                       | <2.5% | <10% |
| 100~200(包括 200) |                       | <1.5% | <10% |
| >200            | 在 0~100%MCR 范围内不超过±3% | <1.0% | <10% |
| 注: MCR 为最大连续负荷  |                       |       |      |

4.9.4 调节系统动态过程应能迅速稳定,理想状态为非周期过程,实际多为衰减振荡过程,振荡次数不应超过 2~3 次,当转速波动的幅值小于  $\delta n_0/2_0$  时,其所经历的时间为系统稳定时间。

#### 4.10 汽阀油动机关闭时间

高、中压调节汽阀和高、中压主汽阀油动机的总关闭时间 $t$ 为关闭过程中的动作延迟时间 $t_1$ 和关闭时间 $t_2$ 之和,建议值列于表 7。

表 7 汽阀油动机总关闭时间

| 机组额定功率<br>MW    | 调节汽阀  | 主汽<br>阀 | 机组额定功率<br>MW    | 调节汽阀  | 主汽<br>阀 |
|-----------------|-------|---------|-----------------|-------|---------|
| <100(包括 100)    | <0.5s | <1.0s   | 200~600(包括 600) | <0.4s | <0.3s   |
| 100~200(包括 200) | <0.5s | <0.4s   | >600            | <0.3s | <0.3    |

## 5 试验准备

### 5.1 拟定试验计划与组织分工

5.1.1 拟定试验计划、编写试验大纲,其内容包括:试验目的、试验项目、试验方法、试验步骤、试验条件、注意事项、安全措施以及时间安排。

5.1.2 成立试验领导小组,试验过程由一人统一指挥,统一行动,分工要明确,任务要具体,岗位要严明。

5.1.3 参加考核、验收试验的各方,应对试验方法、标准和仪器仪表的精度等达成协议,对于进口机组也可以采用本方法以外的试验方法和标准。

5.1.4 参加试验的各方应明确职责,共同制定编写试验大纲和试验报告。

### 5.2 仪器、仪表

5.2.1 试验所使用的记录(自动记录)仪器、仪表,其精度、频率响应和记录速度应能满足被测量对象的要求。最好使用专用仪器、仪表。

5.2.2 试验所使用的监视(手抄记录)仪表,可以采用经过校验合格的常规运行表计。

5.2.3 进行汽轮机调节系统静态特性试验(包括静止试验、空负荷试验、带负荷试验)和保安系统试验时,其测量变量及所使用的仪表精度列于表 8。

表 8 调节系统静态特性试验的测量变量和仪表精度

| 序 号 | 测 量 变 量  | 仪表精度  |
|-----|----------|-------|
| 1   | 功率       | ±0.2% |
| 2   | 转速       | ±0.1% |
| 3   | 蒸汽流量     | ±0.5% |
| 4   | 主蒸汽压力    | ±1%   |
| 5   | 再热蒸汽压力   | ±1%   |
| 6   | 主蒸汽温度    | ±5℃   |
| 7   | 再热蒸汽温度   | ±5℃   |
| 8   | 调节级后蒸汽压力 | ±1%   |
| 9   | 抽汽蒸汽压力   | ±1%   |

|    |                     |       |
|----|---------------------|-------|
| 10 | 高压主汽阀油动机行程          | ±1%   |
| 11 | 再热主汽阀油动机行程          | ±1%   |
| 12 | 高压调节汽阀油动机行程         | ±1%   |
| 13 | 再热调节汽阀油动机行程         | ±1%   |
| 14 | 可调整抽汽调节阀油动机行程       | ±1%   |
| 15 | 抽汽逆止阀行程             | ±1%   |
| 16 | 调节系统控制流体的供给压力(主油压)  | ±0.5% |
| 17 | 调节系统控制流体的工作压力(调节油压) | ±0.5% |
| 18 | 保护系统流体的工作压力(安全油压)   | ±0.5% |
| 19 | 调节、保护系统流体温度         | ±1℃   |
| 20 | 负荷或转速给定指令(同步器)      | ±1%   |

5.2.4 进行汽轮机调节系统动态特性试验时，其测量变量及所使用的仪表精度列于表 9。

表 9 调节系统动态特性试验的测量变量和仪表精度

| 序 号 | 测 量 变 量            | 仪表精度  |
|-----|--------------------|-------|
| 1   | 发电机定子电流            | ±2%   |
| 2   | 发电机有功功率            | ±0.5% |
| 3   | 转速                 | ±0.1% |
| 4   | 负荷给定指令             | ±1%   |
| 5   | 主蒸汽压力              | ±1%   |
| 6   | 汽轮机内的蒸汽压力          | ±1%   |
| 7   | 高压调节汽阀油动机行程        | ±1%   |
| 8   | 再热调节汽阀油动机行程        | ±1%   |
| 9   | 可调整抽汽调节阀油动机行程      | ±1%   |
| 10  | 抽汽逆止阀行程            | ±1%   |
| 11  | 调节系统控制流体工作压力(调节油压) | ±0.5% |
| 12  | 保护系统流体压力(安全油压)     | ±0.5% |

5.2.5 对于大于 200MW 汽轮机的电液调节系统，测量迟缓率时，转速测量精度应为±0.02%，其死区要小于实际系统迟缓率的 10%。油动机和调节汽阀行程测量的精度应为±0.5%。

5.2.6 在进行试验之前，将试验所需要的专用仪器、仪表安装在试验机组上。

5.2.7 在进行试验之前，将所使用的仪器、仪表编号，并作好记录。

5.2.8 在进行试验之前，绘制好记录测量变量的表格和修正曲线。

## 6 保安系统试验

### 6.1 提升转速试验

6.1.1 提升转速试验也称超速试验，其目的是调整、校验危急保安器，设定转速。

6.1.2 试验是在汽轮机空负荷状态下进行的。除被试验的危急保安器外，其他保护装置均应投入工作。超速跳闸指示装置动作，指示应正确。

6.1.3 汽轮机冷态启动，应在带 25%~30%额定负荷连续运行 3~4h 后再进行试验。

6.1.4 试验前应手操就地跳闸装置，主汽阀、调节汽阀油动机应能迅速关闭，转速立即下

降, 确认工作正常。

6.1.5 若机组设有不提升转速也可以使危急保安器动作的装置(充油装置), 可先用此装置进行试验, 当确认危急保安器动作正常后, 再进行提升转速试验。

6.1.6 用为提升转速而设置的超速试验装置提升转速, 或用同步器升速到 3150r/min 后再用超速试验装置继续提升转速, 直到危急保安器动作。若转速达到危急保安器动作转速而未动作时, 应立即手动停机。

6.1.7 提升转速过程应平稳、缓慢, 不要在高转速下停留。升速率不大于每秒 0.2%额定转速。

6.1.8 试验过程记录危急保安器动作转速和复位转速。

6.1.9 每只危急保安器一般进行两次试验, 两次动作转速差不应超过 0.6%额定转速。当机组为初次投运, 应进行三次试验, 第三次动作转速与前两次动作转速平均值之差不超过 1%额定转速。

6.1.10 试验过程应严密监视汽轮机转速、轴承振动。超过规定值应立即手动停机。

## 6.2 汽阀严密性试验

6.2.1 为避免汽轮发电机组在突然甩负荷或紧急停机过程中转速的过度飞升, 以及在低转速范围内能有效地控制转速、高、中压主汽阀和高、中压调节汽阀的严密性必须符合要求。

6.2.2 试验是在汽轮机空负荷状态下进行的。蒸汽参数和真空应尽量保持额定。主(再热)蒸汽压力最低不得低于额定压力的 50%。主汽阀或调节汽阀关闭后, 汽轮机转速应能下降至式(8)的计算值。

$$n < (p/p_0) \times 1000 \quad \text{r/min} \quad (8)$$

式中:  $p$ ——试验条件下的主蒸汽或再热蒸汽压力, MPa;

$p_0$ ——额定主蒸汽或再热蒸汽压力, MPa。

6.2.3 对于中压机组阀门的最大蒸汽泄漏量应不致影响转子降速至静止。对于主蒸汽压力为 9MPa 或以上的机组, 其阀门最大蒸汽泄漏量不致影响转子降速至 1000r/min 以下。

6.2.4 要求每类阀门分别单独试验。在额定转速下调节汽阀(或主汽阀)处于全开状态, 迅速关闭主汽阀(或调节汽阀), 记录降速过程时间和最低稳定转速。

6.2.5 汽阀严密性试验也可以按制造厂提供的方法和标准进行。

6.2.6 试验过程中应注意汽轮机胀差、轴向位移、机组振动和缸温变化。

6.2.7 试验过程中应注意保持锅炉汽压、汽温、汽包水位。

## 6.3 汽阀油动机关闭时间的测定

6.3.1 机组甩负荷在调节系统控制下的瞬时最高转速, 以及在调节系统失控情况下的危急超速最高转速应在允许的范围内, 为此, 调节汽阀油动机和主汽阀油动机的总关闭时间必须符合要求。

6.3.2 试验在汽轮机静止状态下进行。调节、保安系统调试完毕, 油质合格, 油压、油温近于正常运行工况。

6.3.3 主汽阀油动机全开, 调节汽阀油动机处于额定负荷位置, 操作跳闸装置, 迅速关闭高、中压主汽阀和调节汽阀油动机, 自动记录由发出跳闸指令至油动机关闭的全过程时间。

6.3.4 分别采用机械式和电气式跳闸装置、就地 and 遥控等操作方式进行试验。跳闸指令要与实际运行工况相符(包括指令发出的位置和过程时间等)。

6.3.5 在自动记录曲线上, 查取由指令发出至油动机开始动作的延迟时间 $t_1$ , 以及油动机开始动作至全部关闭的时间 $t_2$ 。

6.3.6 汽阀油动机关闭时间, 是在汽阀上无蒸汽作用力的情况下的测定结果, 考虑蒸汽作用力的影响, 需要用有蒸汽条件下的试验结果加以修正。

## 6.4 危急超速最高转速的测定

机组甩负荷在汽轮机调节系统拒动失控的情况下, 危急保安器动作, 主汽阀关闭后的最高转速。一般在不经历实际超速的条件下, 采用计算或计算与试验相结合的方法进行预测。

#### 6.4.1 危急超速最高转速的计算方法

##### 6.4.1.1 计算公式

$$n_{\text{wmax}} = (30/\pi) \sqrt{(\pi n_w / 30)^2 + (2P/J) [\alpha_H(t_{1H} + \mu_H t_{2H}) + \alpha_I(t_{1I} + \mu_I t_{2I}) + T_V]} \quad (\text{r/min}) \quad (9)$$

##### 6.4.1.2 参数确定的方法

a) 最大加速度下危急保安器实际平均动作转速 $n_w$ , 由相对平均动作转速 $\Delta n_p$ 、相对动作转速长期偏差 $\Delta n_c$ 和动作转速的加速度偏差 $\Delta n_a$ 组成。

$$n_w = n_0 \times (\Delta n_p + \Delta n_c + \Delta n_a) \quad (\text{r/min}) \quad (10)$$

式中:  $\Delta n_p$ ——平均动作转速 $n_p$ 为连续进行 $K(K \geq 5)$ 次危急保安器提升转速试验, 不计第一次的平均值。其平均动作转速与额定转速 $n_0$ 之比, 称相对平均动作转速 $\Delta n_p$ ;

$\Delta n_c$ ——机组稳定运行后, 在不同的运行时间内分别进行危急保安器提升转速试验, 其最大值 $n_{\text{cmax}}$ 和平均动作转速 $n_p$ 的差与额定转速 $n_0$ 之比, 称相对动作转速长期偏差 $\Delta n_c$ , 一般为+1%~ -0.5%;

$\Delta n_a$ ——当汽轮机突然甩负荷、转子被加速时, 其最大加速度将会增加危急保安器动作后的转速, 这一增加值为加速度偏差 $n_a$ , 加速度偏差 $n_a$ 与额定转速 $n_0$ 之比, 称相对加速度偏差 $\Delta n_a$ 。可在制造厂提供的加速度偏差曲线中查取, 一般约为0.5%。

b) 加速功率 $P$ , 对于再热式汽轮机, 由于高压缸和中、低压缸功率分配比例的不同, 因而各缸的加速能量, 应按额定功率 $P_0$ 分别乘以高、中低压缸功率比例系数 $\alpha_H$ 、 $\alpha_I$ 计算。

由于机组的各种机械损失都随着机组转速的升高而增加, 所以, 加速功率 $P$ 需要计入机组的功率损耗。加速到危急超速最高转速 $n_{\text{max}}$ 时的实际加速功率 $P$ 为:

$$P = P_0 - P_F \quad \text{W} \quad (11)$$

$$P_F = P_{10}(n/n_0)^3 + P_{20}(n/n_0) + P_{30}(n/n_0)^3 \quad \text{W} \quad (12)$$

式中:  $P_F$ ——汽轮发电机组损耗功率, W;

$P_{10}$ ——主油泵、发电机风扇等转动部件损耗功率, W;

$P_{20}$ ——推力、支撑轴承损耗功率, W;

$P_{30}$ ——叶栅摩擦、鼓风损失功率, W。

采用额定功率计算, 对转速的计算结果略高, 一般可不计入功率损耗。

c) 主汽阀延迟、关闭过程时间 $t_1$ 、 $t_2$ , 分别测取高、中压主汽阀的延迟、关闭时间 $t_{1H}$ 、 $t_{1I}$ 、 $t_{2H}$ 、 $t_{2I}$ 。其延迟时间最好测量多次取其平均值。关闭时间应采用有蒸汽作用下的测定结果, 若在机组静止状态下测量, 需要对其结果加以修正。在计算高、中压主汽阀关闭过程中的加速能量时, 还应分别乘以阀门的流量系数 $\mu_H$ 、 $\mu_I$ 。高压主汽阀流量系数 $\mu_H$ 一般为0.84, 中压主汽阀流量系数 $\mu_I$ 一般为0.88。

d) 机组转子转动惯量 $J$ 和蒸汽容积时间常数 $T_V$ , 可选用同型机组的实测值或制造厂提供的设计值(参考值见附录D)。

#### 6.4.2 危急超速最高转速的试验方法

6.4.2.1 采用间接试验方法——测功法(试验方法详见8.2条测功法甩负荷试验)。这种方法是在机组不与电网解列的情况下, 迅速关闭高、中压主汽门, 根据测取到的有功功率变化过

程, 进行能量转换计算得到危急超速最高转速。

6.4.2.2 当主汽门的延迟、关闭时间小于调节汽门的延迟、关闭时间, 且主汽门的导管较短时, 或机组无法实现仅关闭主汽门的情况下, 也可以采用主汽门和调节汽门同时关闭的方法进行。

6.4.2.3 计算公式如下:

$$n_{w_{max}} = n_w + (30.42/J)(n_0/n)(P_0/P) + \int_{t_0}^t P(t) dt \quad (\text{r/min}) \quad (13)$$

式中:  $t_0$ ——试验起始时间, s;

$t$ ——电功率降至零的时间, s;

$n_w$ ——危急保安器实际平均动作转速, r/min;

$J$ ——转子转动惯量,  $\text{kg} \cdot \text{m}^2$ ;

$n_0$ ——额定转速, (3000r/min)r/min,  $n_0=3000\text{r/min}$ ;

$n$ ——试验起始转速, r/min;

$P_0$ ——额定功率, kW;

$P$ ——试验起始功率, kW。

6.4.2.4 试验计算结果转速偏高, 一般不作处理, 必要时进行修正(修正方法见附录 B)。

## 7 调节系统静态特性试验

调节系统静态特性试验包括静止试验、空负荷试验和负荷试验。

### 7.1 静止试验

#### 7.1.1 试验目的

调节系统静止试验也称静态调整试验。测取调节部套静态相关特性, 初步确定调节系统静态特性, 为机组创造安全、可靠的启动条件。

#### 7.1.2 试验条件

汽轮机在静止状态下, 调节系统安装、调整完毕。油压、油温近于正常运行工况, 油质合格。

#### 7.1.3 试验方法

7.1.3.1 将同步器(转速给定)分别设定在额定转速、105%额定转速和 95%额定转速的位置上, 连续变化(不得停留或反向操作)转速模拟信号, 控制调节汽阀油动机开启至最大, 再反向连续变化转速模拟信号, 控制调节汽阀油动机由最大关至最小, 记录相关数据。

7.1.3.2 在无法实现模拟转速的情况下, 也可以采用与转速相关的部套环节量取代。

7.1.3.3 可调整抽汽式汽轮机, 除进行凝汽工况的试验外, 还要进行抽汽工况试验。连续变化抽汽压力模拟信号, 控制抽汽调节阀油动机开启至最大, 再反向连续变化抽汽压力模拟信号, 控制抽汽调节阀油动机由最大关至最小。记录相关数据, 测取调压器特性、压力不等率和抽汽调节系统静态特性。

7.1.3.4 电液调节系统应测取控制系统的模拟量输出与调节汽阀油动机行程关系特性。

7.1.3.5 根据试验测量结果绘制特性曲线:

一部套相关特性曲线:  $X=f(n)$ ,  $S=f(X)$ 。

一静止无蒸汽条件下的调节系统静态特性曲线:  $S=f(n)$ 。

7.1.3.6 根据特性曲线计算特征值:

调节系统转速不等率和调节系统系统迟缓率。

## 7.2 空负荷试验

### 7.2.1 试验目的

- 获取调节系统如下性能:
- 调速器(转速敏感机构)特性;
- 传动放大机构特性;
- 调节汽阀油动机行程与转速相关特性;
- 同步器工作范围;
- 调节系统转速不等率;
- 调节系统迟缓率;
- 转速稳定性。

### 7.2.2 试验条件

7.2.2.1 发电机与电网解列、汽轮机在空负荷无励磁条件下运行。试验过程中蒸汽参数、真空尽可能保持在额定值上。

7.2.2.2 保安系统试验完毕,并符合要求。

### 7.2.3 空负荷试验方法

7.2.3.1 将同步器(转速给定)分别设定在额定转速、105%额定转速和 95%额定转速位置上,连续、缓慢、单方向减少蒸汽流量,使转速降低,控制调节汽阀油动机开至最大。之后,再连续、缓慢、单方向地增加蒸汽流量,使转速升高,控制调节汽阀油动机由最大关至最小。改变转速的方法见附录 C。记录相关数据。

7.2.3.2 根据试验测量结果绘制特性曲线:

- 调速器输出与转速关系特性曲线,  $X=f(n)$ 。
- 传动放大机构(或其他变量)特性曲线,  $S=f(X)$ 。
- 调节汽阀油动机行程与转速关系特性曲线,  $S=f(n)$ 。

7.2.3.3 根据特性曲线计算特征值:

- 调速器迟缓率;
- 调节系统迟缓率(忽略蒸汽作用力的条件下);
- 调节系统转速不等率(在已知油动机行程与发电机有功功率关系的设计工况下)。

### 7.2.4 同步器工作范围的测定

调整同步器(转速给定)从下限位置到上限位置,改变转速,记录空负荷最高控制转速和空负荷最低控制转速。

### 7.2.5 转速稳定性

给同步器(转速给定装置)一阶跃偏差引发扰动,检验汽轮机空负荷时的转速稳定性。

## 7.3 带负荷试验

### 7.3.1 试验目的

- 通过试验获取调节系统在有蒸汽作用下的特性:
- 配汽机构特性;
- 调节汽阀重叠度特性;
- 调节汽阀提升力特性;
- 调节汽阀油动机迟缓率;
- 负荷稳定性。

### 7.3.2 试验条件

7.3.2.1 汽轮机在额定参数下稳定运行,主蒸汽压力偏差不超过额定值的 $\pm 1\%$ ,主蒸汽温度偏差不超过 $\pm 5^\circ\text{C}$ 。大于允许偏差时应进行修正。

7.3.2.2 给水回热系统正常投入运行。

7.3.2.3 电网频率尽可能保持稳定。

### 7.3.3 负荷试验方法

7.3.3.1 负荷试验在初始负荷(或实际可能低的负荷)至额定负荷之间进行。负荷试验点的间隔不大于 5%额定负荷,在最低负荷和额定负荷附近,要适当增加负荷试验点。尽可能选择每一只调节汽阀开启的位置作为负荷试验点。

7.3.3.2 在每一负荷试验点下,应稳定 5min~10min,记录 3 次~5 次。记录间隔为 2min~3min。

7.3.3.3 记录项目:负荷设定值、发电机有功功率、调节汽阀油动机行程、调节汽阀开度、调节汽阀油动机活塞上、下油压(双侧进油油动机)或油动机油缸内油压(单侧进油油动机)、功率摆动值和蒸汽参数。

7.3.3.4 根据试验测量结果绘制特性曲线:

—调节汽阀油动机行程与发电机有功功率关系曲线(配汽机构特性),  $S=f(P)$ 。

—调节汽阀油动机行程(负荷或蒸汽流量)与调节汽阀位移关系曲线(调节汽阀重叠度特性),  $h=f(S)$ 。

### 7.3.4 调节汽阀油动机提升力

在连续、单向、稳定的增加负荷的过程中,在每一负荷试验点上,记录调节汽阀行程和油动机活塞上、下油压差。根据油压差计算调节汽阀开启过程中的提升力,绘制调节汽阀升程与提升力关系曲线(调节汽阀提升力特性)。

### 7.3.5 调节汽阀油动机迟缓率

在连续、单向、稳定的增加和减少负荷的过程中,在每一负荷试验点上,记录调节汽阀油动机位移,根据对应于某一负荷设定点的油动机位移差,按空负荷试验结果油动机行程与转速关系曲线,计算在有蒸汽作用力影响下的调节汽阀油动机迟缓率。

### 7.3.6 负荷稳定性

根据发电机有功功率的变化值计算负荷短期稳定性。

## 7.4 调节系统静态特性

7.4.1 根据调节系统静止、空负荷、带负荷试验结果,绘制调节系统静态特性曲线(图 1)。

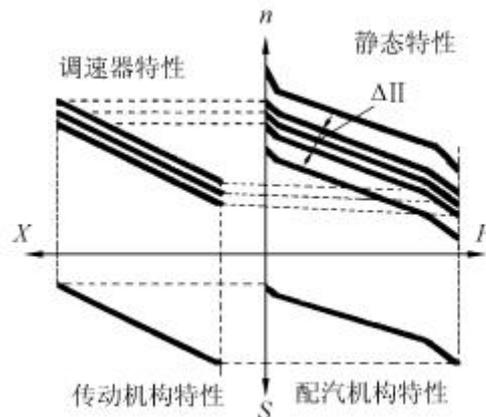


图 1 调节系统静态特性曲线

7.4.2 根据调节系统静态试验结果绘制调节汽阀重叠度特性曲线,  $h=f(S)$ 。

7.4.3 根据调节系统静态试验结果绘制调节汽阀提升力特性曲线,  $F=f(h)$ 。

7.4.4 根据调节系统静态试验结果计算特征值:

—调节系统转速不等率;

- 局部转速不等率(为静态特性曲线上各负荷点的切线斜率);
- 调速器迟缓率;
- 油动机迟缓率;
- 调节系统迟缓率。

## 8 调节系统动态特性试验

### 8.1 常规法(甩电负荷)甩负荷试验

#### 8.1.1 目的和适用范围

8.1.1.1 考核调节系统动态特性。

8.1.1.2 首台新型机组或调节系统改造后的机组, 必须采用常规法甩负荷试验。

8.1.1.3 适用于汽轮机调节系统的考核试验, 也可以用于新投产机组汽轮机调节系统的验收试验。

#### 8.1.2 试验条件

8.1.2.1 主要设备无重大缺陷, 操作机构灵活, 主要监视仪表准确。

8.1.2.2 调节系统静态特性符合要求。

8.1.2.3 保安系统动作可靠, 危急保安器提升转速试验合格, 手动停机装置动作正常。

8.1.2.4 主汽阀和调节汽阀严密性试验合格, 油动机关闭时间符合要求。

8.1.2.5 抽汽逆止阀联锁动作正常, 关闭严密。

8.1.2.6 高压启动油泵、交直流润滑油泵联锁动作正常, 高压加热器保护动作正常。

8.1.2.7 油系统油质合格。

8.1.2.8 利用抽汽作为除氧器或给水泵汽源的机组, 其备用汽源应能自动投入。

8.1.2.9 汽轮机旁路系统应处于热备用状态。

8.1.2.10 锅炉过热器、再热器安全阀调试、校验合格。

8.1.2.11 主要监视仪表准确, 热工控制系统工作正常, 热工、电气保护接线正确、动作可靠, 并能满足试验的要求。

8.1.2.12 厂用电源可靠。

8.1.2.13 发电机主开关和励磁开关跳合正常。

8.1.2.14 电网周波保持在  $50\text{Hz} \pm 0.1\text{Hz}$  以内, 并留有备用容量。

8.1.2.15 试验用仪器、仪表校验合格, 并已接入测量系统。

8.1.2.16 试验领导组织机构成立, 明确了职责分工。

8.1.2.17 已取得电网调度的同意。

#### 8.1.3 试验方法

8.1.3.1 试验准备工作就绪后, 由试验负责人下达试验开始命令, 由运行值班人员进行甩负荷的各项操作。

8.1.3.2 断开发电机主开关, 机组与电网解列甩去全部负荷, 记录有关数据, 测取汽轮机调节系统动态特性。

8.1.3.3 凝汽或背压式汽轮机甩负荷试验, 一般按甩 50%和 100%额定负荷两级进行。当甩 50%额定负荷后, 转速超调量大于或等于 5%时, 则应中断试验, 不再进行甩 100%额定负荷试验。

8.1.3.4 可调整抽汽式汽轮机, 首先按凝汽工况进行甩负荷试验, 合格后再投入可调整抽汽, 按最大抽汽流量进行甩负荷试验。

8.1.3.5 试验应在额定参数、回热系统全部投入等正常系统、运行方式和运行操作下进行。不得采用发电机甩负荷的同时, 锅炉熄火停炉、汽轮机停机等运行操作方式。

8.1.3.6 根据机组的具体情况，必要时在甩负荷试验之前，对设备的运行方式和运行参数的控制方法等，可以作适当的操作和调整。

8.1.3.7 试验过程中应设专人监视转速的变化，注意锅炉汽温、汽压和水位的变化。

8.1.3.8 机组甩负荷以后，在调节系统动态过程尚未终止之前，不可操作同步器(具有同步器自动返回功能的电液调节系统除外)。

8.1.3.9 甩负荷试验过程结束、测试和检查工作完毕后，应尽快并网接带负荷。

#### 8.1.4 安全措施

8.1.4.1 机组甩负荷后应使锅炉不超压、汽轮机不超速、发电机不过压，维持机组空负荷稳定运行。

8.1.4.2 机组甩负荷后，当转速飞升未达到危急保安器动作转速时，待甩负荷过程结束、测试工作结束后，速将转速降至 3000r/min，进行如下检查：

- 轮机旁路系统开启情况。
- 汽封压力、除氧器压力、除氧器水位和凝汽器水位。
- 串轴、胀差和排汽压力。
- 开启汽轮机本体及抽汽管道疏水。
- 高压加热器保护动作是否正常。
- 机组振动情况。

8.1.4.3 机组甩负荷后，若转速飞升使危急保安器动作时，应及时作如下操作和检查：

- 操作同步器至空负荷位置。
- 检查主汽阀、调节汽阀和抽汽逆止阀是否关闭。
- 待机组转速降至挂闸转速时挂闸。
- 若机组转速继续下降时，应及时启动高压油泵。
- 设法恢复机组转速至 3000r/min，并完成对有关项目的检查。

8.1.4.4 机组甩负荷后，转速飞升至危急保安器动作转速而未动作时，应立即打闸停机。若转速仍继续上升时，则应采取一切切断汽源的措施，破坏真空紧急停机。

8.1.4.5 机组甩负荷后，调节系统严重摆动，无法维持空负荷运行时，应立即打闸停机。

8.1.4.6 机组甩负荷后，锅炉应停止全部给粉，维持部分油枪运行。当机组恢复至空负荷运行时，维持燃烧，调整参数到额定值。机组甩负荷后，若锅炉泄压手段失灵超压时，应紧急停炉。

8.1.4.7 试验过程中若发生事故，应由试验负责人下达命令停止试验，试验人员应立即撤离现场。

#### 8.1.5 试验记录与监测

8.1.5.1 甩负荷试验过程中自动记录的项目有：发电机有功功率、转速、油动机行程和有关油压变量。可根据机组的具体情况增加记录内容。

8.1.5.2 甩负荷试验过程中手抄记录的项目有：发电机有功功率、转速、油动机行程、有关油压变量、蒸汽参数、排汽压力和同步器行程。可根据机组的具体情况增加记录内容，也可以利用机组的数据采集装置自动记录代替手抄记录。

8.1.5.3 手抄项目应记录甩负荷前的初始值，甩负荷过程中的极值(最大或最小)和甩负荷过程结束后的稳定值。

8.1.5.4 记录中若发生仪表显示异常时，也应一并记录在表格中，以便作为分析的依据。

8.1.5.5 在进行甩负荷试验的过程中，除设专人监视转速外，其他监视项目均按运行规程中的有关要求设置。

#### 8.1.6 试验结果整理

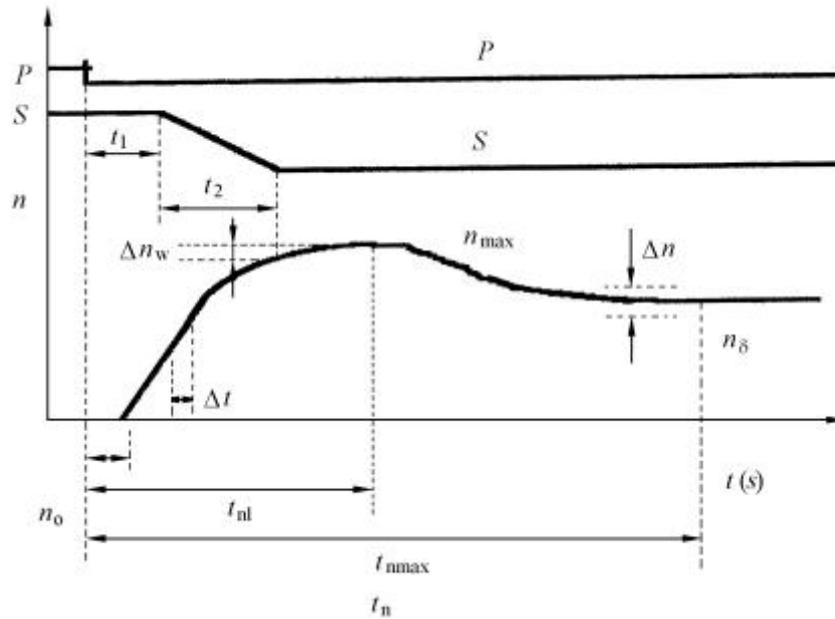


图2 常规法甩负荷试验记录曲线

8.1.6.1 手抄记录项目按机组甩负荷前、甩负荷过程中、甩负荷稳定后的数据列于表 10。

表 10 手抄记录汇总表

| 序 号 | 名 称 | 单 位 | 初 值 | 极 值 | 稳 定 值 |
|-----|-----|-----|-----|-----|-------|
|     |     |     |     |     |       |
|     |     |     |     |     |       |
|     |     |     |     |     |       |

8.1.6.2 根据自动记录曲线(图 2)测取的动态参数有：初始转速 $n_0$ 、瞬时最高转速 $n_{max}$ 、稳定转速 $n_{\delta}$ 、汽阀关闭后的飞升转速 $\Delta n_v$ 、转速波动值 $\Delta n$ 、转速时滞时间 $t_{n1}$ 、达到最高转速时间 $t_{nmin}$ 、转速变化过渡过程时间 $t_n$ 、油动机延迟时间 $t_1$ 、油动机关闭时间 $t_2$ 、油压变量的延迟时间 $n_{p1}$ 和过渡过程时间 $t_{p2}$ 。

8.1.6.3 将由自动记录曲线测取的有关动态参数列于表 11。

表 11 动态参数汇总表

| 序 号 | 名 称 | 单 位 | 甩 50%负荷 | 甩 100%负荷 | 备 注 |
|-----|-----|-----|---------|----------|-----|
|     |     |     |         |          |     |
|     |     |     |         |          |     |
|     |     |     |         |          |     |

8.1.6.4 根据测取到的数据计算如下特征值：

a) 动 态 超 调 量 : 
$$\varphi = (n_{max} - n_0) / n_0 \times 100$$
  
%

(14)

b) 转 速 不 等 率 : 
$$\delta = (n_{\delta} - n_0) / n_0 \times 100$$

% (15)

c) 动 静 差 比 : 
$$\beta = (n_{max} - n_0) / (n_s - n_0)$$

(16)

d) 转 子 加 速 度 : 
$$\alpha = \Delta n_r / \Delta t$$
  
r/min<sup>2</sup> (17)

s (18)

e) 转 子 时 间 常 数 : 
$$T_s = n_0 / \alpha$$

kg · m<sup>2</sup> (19)

f) 转 子 转 动 惯 量 : 
$$J = 1000 T_s P / \alpha \eta$$

s (20)

g) 容 积 时 间 常 数 : 
$$T_v = \Delta n_r / a$$

h) 稳定时间:  $\Delta n < (\delta n_0 / 20)$  时所经历的时间s 篇

(21)

i) 发 电 机 效 率 :  $\eta$

%

## 8.2 测功法(甩汽负荷)甩负荷试验

### 8.2.1 目的和适用范围

8.2.1.1 测取汽轮发电机组甩负荷后有功率率变化过渡过程曲线, 计算瞬时最高转速。

8.2.1.2 用于新投产机组的验收试验, 机组大、小修前后的校核试验。

8.2.1.3 用于危急超速最高转速的测定。

### 8.2.2 试验条件

8.2.2.1 已取得该型机组转子实测转动惯量, 或制造厂提供了该试验机组设计转动惯量。

8.2.2.2 调节系统静态特性符合要求。

8.2.2.3 保安系统动作可靠, 危急保安器提升转速试验合格, 手动停机装置动作正常。

8.2.2.4 主汽阀和调节汽阀严密性试验合格, 油动机关闭时间符合要求, 油系统油质合格。

8.2.2.5 抽汽逆止阀联锁动作正常, 关闭严密。

8.2.2.6 高压启动油泵、交直流润滑油泵联锁动作正常, 高压加热器保护动作正常。

8.2.2.7 锅炉过热器、再热器安全阀调试、校验合格。

8.2.2.8 主要监视仪表准确, 热工控制系统工作正常, 热工、电气保护接线正确、动作可靠, 并能满足试验的要求。

8.2.2.9 机组在带负荷不与电网解列的条件下, 对确保关闭调节汽阀、抽汽逆止阀所采取的措施已完成。

8.2.2.10 调节汽阀油动机关闭操作方式、试验起始指令等, 应尽量与甩负荷工况相一致。

8.2.2.11 其他辅助设备运行正常, 不存在影响甩负荷试验的隐患。

8.2.2.12 厂用电源可靠。

8.2.2.13 发电机主开关和励磁开关跳合正常。

8.2.2.14 电网周波保持在 50Hz ± 0.1Hz 以内, 并留有备用容量。

8.2.2.15 试验用仪器、仪表校验合格, 并已接入测量系统。

- 8.2.2.16 试验领导组织机构成立,明确了职责分工。
- 8.2.2.17 已取得电网调度的同意。
- 8.2.3 试验方法
- 8.2.3.1 直接进行甩 100%额定负荷试验。
- 8.2.3.2 机组在额定参数、回热系统全部投入等正常方式下运行。
- 8.2.3.3 在机组不与电网解列的情况下,迅速关闭高、中压调节汽阀、抽汽逆止阀,切断向汽轮机供汽。
- 8.2.3.4 待确认调节汽阀完全关闭后,速将同步器(功率给定装置)置于零位。
- 8.2.3.5 锅炉迅速降低负荷。
- 8.2.3.6 当确认发电机负荷到零并出现逆功率时,4s~6s 后手动打闸或逆功率保护动作关闭主汽阀,联跳(或手操)发电机主开关、机组与电网解列。拆除临时措施,按有关运行规程要求恢复正常运行或停机。
- 8.2.3.7 若调节汽阀油动机未能完全关闭,或已关闭但发电机有功功率不能降到零时,禁止发电机与电网解列,以防超速。
- 8.2.3.8 试验过程中的其他操作及安全注意事项,均应按有关运行规程中的要求执行。
- 8.2.4 试验记录
- 8.2.4.1 手抄记录的主要项目有:主、再热蒸汽参数,调节级压力,高压缸排汽温度,真空,发电机有功功率、转速,油动机行程,同步器位置。
- 8.2.4.2 自动记录的主要项目有:发电机有功功率、转速、油动机行程、试验起始信号。
- 8.2.4.3 监视项目:按有关运行规程的要求设置。
- 8.2.4.4 手抄项目应记录甩负荷前的初值和甩负荷过程结束后的稳定值。
- 8.2.4.5 记录中若发生仪表显示异常时,也应一并记录在表格中,以便作为分析的依据。
- 8.2.5 试验数据整理及计算
- 8.2.5.1 手抄项目按甩负荷前、甩负荷后的数据列于表 12。

表 12 手抄记录汇总表

| 序号 | 名称 | 单位 | 初值 | 稳定值 | 备注 |
|----|----|----|----|-----|----|
|    |    |    |    |     |    |
|    |    |    |    |     |    |
|    |    |    |    |     |    |

- 8.2.5.2 根据自动记录到的发电机有功功率曲线(图 3),用计算机在试验的全过程内对有功功率进行积分运算,或近似按每变化  $\Delta t$ 时刻查取对应的平均有功功率  $\bar{P}(t)$ 列表计算(表 13)。

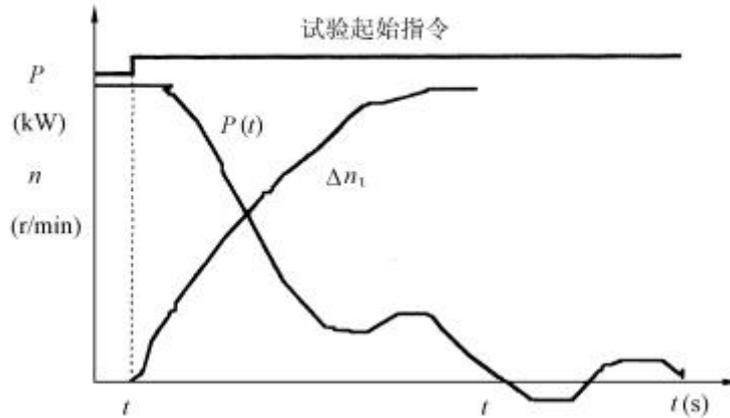


图3 发电机有功功率记录曲线和飞升转速计算曲线图

表 13 测功法计算数据汇总表

| 序 号 | 时间 $t$<br>s | 有功功率 $\bar{P}$ ( $t$ )<br>MW | 时间增量 $\Delta t$<br>s | 转速增量 $\Delta n$<br>r/min | 累计转速飞升 $\Delta n_t$<br>r/min |
|-----|-------------|------------------------------|----------------------|--------------------------|------------------------------|
|     |             |                              |                      |                          |                              |
|     |             |                              |                      |                          |                              |
|     |             |                              |                      |                          |                              |

8.2.5.3 按式(22)计算瞬时最高转速飞升及描绘飞升曲线:

$$\Delta n_t = (30.42 / J)(n_0 / n)(P_0 / P) + \int_{t_0}^t P(t) dt \quad \text{r/min}$$

(22)

式中:  $t_0$ ——试验起始时间, s;

$t$ ——电功率降到零时间, s;

$J$ ——转子转动惯量,  $\text{kg} \cdot \text{m}^2$ ;

$n_0$ ——额定转速, 为 3000r/min;

$n$ ——试验起始转速, r/min;

$P_0$ ——额定功率, kW;

$P$ ——试验起始功率, kW。

8.2.5.4 由于功率变送器惯性的影响, 使试验计算结果转速有正误差, 一般可不作修正, 必要时可对试验结果进行修正(修正方法见附录 B)。应尽量选用时间常数小的有功功率变送器, 以提高试验精度。

### 8.3 甩负荷瞬时最高转速的静态预测

#### 8.3.1 目的和适用范围

8.3.1.1 测量调节汽阀油动机延迟、关闭时间, 计算预测甩负荷瞬时最高转速。

8.3.1.2 适用于机组大修前后检验调节系统工作状态, 预测甩负荷瞬时最高转速。

8.3.1.3 可作为常规法甩负荷试验的预备性试验。

#### 8.3.2 试验条件

8.3.2.1 机组在静止状态下进行试验。

- 8.3.2.2 已取得该型机组转子时间常数(或转子转动惯量)和蒸汽容积时间常数。  
 8.3.2.3 调节系统静态特性符合要求。  
 8.3.2.4 油系统油质合格,油压、油温近于正常运行状态。  
 8.3.2.5 调节汽阀油动机关闭操作方式、试验起始指令等,应尽量与甩负荷工况相一致。

### 8.3.3 试验方法

- 8.3.3.1 调节汽阀油动机处于额定负荷位置,手操或遥控保护装置,迅速关闭调节汽阀油动机,记录油动机动作过程曲线。  
 8.3.3.2 自动记录的项目有油动机行程、试验起始指令、动作过程时间。  
 8.3.3.3 手操记录的项目有油动机位置、油压、油温和油动机关闭操作方式。  
 8.3.3.4 根据油动机动作过程曲线(图 4),测取油动机动作延迟时间 $t_1$ ,对应于油动机额定负荷位置 $S_N$ 至空负荷位置 $S_0$ 工作行程关闭时间 $t_2$ 和等值关闭时间 $t'_2$ 。

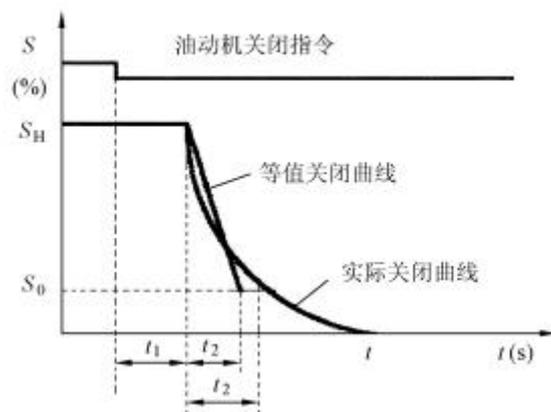


图 4 油动机动作过程曲线

### 8.3.4 静态预测计算方法

#### 8.3.4.1 静态预测公式

$$\Delta n_{\text{max}} = (n_0 / T_a) \psi [T_V + \alpha_H (t_{H1} + t_{H2} / 2) + \alpha_L (t_{L1} + t_{L2} / 2)] \quad \text{r/min} \quad (23)$$

式中:  $n_0$ ——额定工作转速, r/min;

$T_a$ ——转子时间常数, s;

$\psi$ ——甩负荷相对值, %;

$T_V$ ——蒸汽容积时间常数, s;

$\alpha_H$   $\alpha_L$ ——高、中低压缸功率比例系数, %;

$t_{H1}$ 、 $t_{L1}$ ——高、中压油动机延迟时间, s;

$t_{H2}$ 、 $t_{L2}$ ——高、中压油动机工作行程等值关闭时间或工作行程关闭时间, s。

#### 8.3.4.2 动态常数的确定

a) 转子时间常数最好采用制造厂提供的设计值,或采用本机或同型机组的实测值(参考值见附录 D)。

b) 蒸汽容积时间常数最好采用计算值,或根据常规法甩负荷试验测取的动态参数按静态预测公式反运算求得,也可以采用常规法甩负荷试验的测量值。

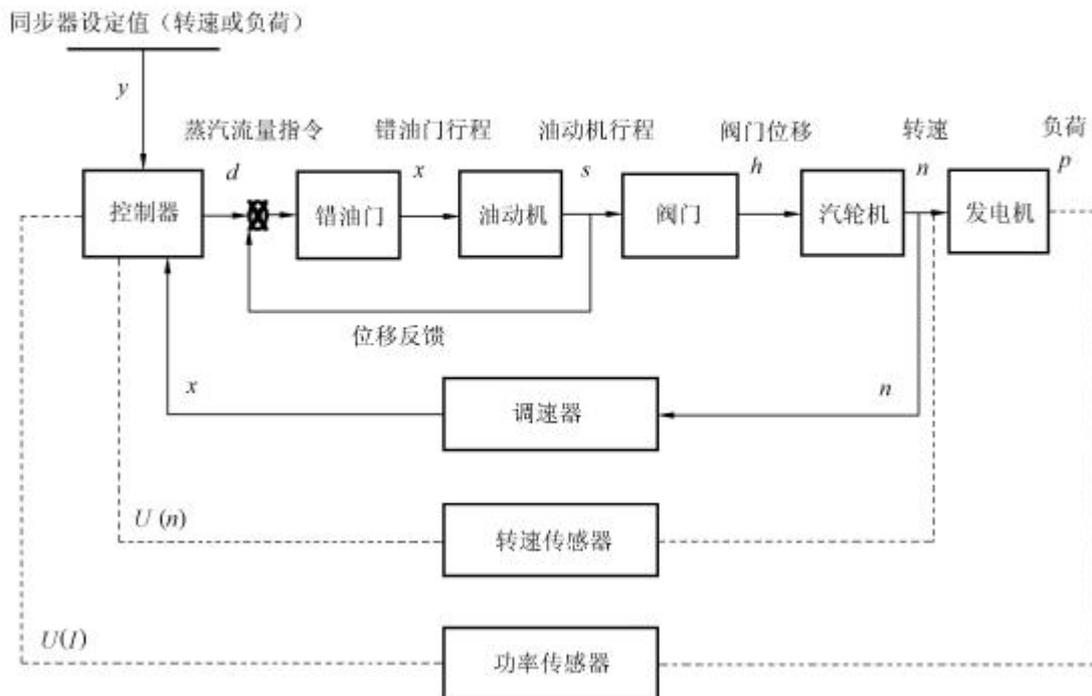
c) 对于同一类阀门(高压或中压)有多只油动机,其延迟时间和工作行程等值关闭时间应取其平均值。与实际关闭曲线包围面积相等的直线称等值关闭线,所对应的时间为等值关闭时间。油动机在工作行程范围内有良好的线性情况下,工作行程等值关闭时间可以取用工作行程关闭时间。

d)甩负荷相对值为甩负荷初始功率和额定功率之比。高、中低压缸功率比例系数，采用设计值或近似取用  $\alpha_H = 0.3$ 、 $\alpha_I = 0.7$ 。

## 9 编写试验报告

- 9.1 试验目的及范围。
- 9.2 调节保安系统类型、动作原理和设备概况。
- 9.3 测点及仪器、仪表一览表，注明精度。
- 9.4 试验方法。
- 9.5 试验条件。
- 9.6 试验结果用表格、曲线或图示表示。
- 9.7 试验结果与要求的技术规范进行比较，作出评价和结论。

### 附录 A(标准的附录)汽轮机调节控制系统方框图



实线—机械液压型调节系统；虚线—电液型调节系统

图 A 汽轮机调节控制系统方框图

### 附录 B(标准的附录)测功法甩负荷试验结果的修正方法

B1 测功法甩负荷试验结果一般高于等价的常规法甩负荷试验结果，最大偏差约不超过 25r/min，必要时可对试验结果进行修正。

修正公式是对测功法甩负荷试验瞬时最高转速的最大值进行修正，其修正值仅与功率变送器的响应时间  $T_r$  (或时间常数  $T$ ) 及试验初始功率  $P$  有关，与甩负荷过程无关。

B1.1 在已知功率变送器响应时间  $T_r$ 、汽轮发电机组转子转动惯量的情况下，可用式(B1)

修正:

$$\Delta n_{\max} = \Delta n_{\max} - (30.42/J)(n_0/n)(P_0/P)(PT_r/2.3) \quad \text{r/min} \quad (\text{B1})$$

式中:  $\Delta n_{\max}$ ——由测功法计算公式计算得出的瞬时最高转速, r/min;

$T_r$ ——功率变送器的响应时间, s。

B1.2 在已知功率变送器时间常数  $T$ 、汽轮发电机组转子时间常数的情况下, 可用式(B2)修正。

$$\Delta n_{\max} = \Delta n_{\max} - n_0 (T/T_a) + \Delta n \quad \text{r/min} \quad (\text{B2})$$

式中:  $\Delta n_{\max}$ ——由测功法计算公式计算得出的瞬时最高转速, r/min;

$T_a$ ——转子时间常数, s;

$T$ ——功率变送器时间常数, s;

$\Delta n$ ——试验过程中功率降到零时的转速波动值, r/min。

B1.3 在缺少功率变送器响应时间或时间常数的情况下, 可作近似修正。由振荡开始点至功率为零点连直线, 对功率曲线进行线性修正。

### 附录 C(标准的附录)调节系统空负荷试验改变转速的方法

调节系统空负荷试验改变转速的方法, 根据汽轮机的设计性能和电厂具有的热力循环的不同而不同。

C1 对于有主蒸汽隔离阀和隔离阀旁路的汽轮机, 在关闭主蒸汽隔离阀的情况下, 调节隔离阀旁路阀的开来调整汽轮机的进汽量, 改变汽轮机的转速。

C2 对于没有主蒸汽隔离阀的汽轮机, 可以部分关闭主汽阀来降低转速。

C3 对于具有汽轮机旁路系统的汽轮机, 可以采用关闭高压主汽阀, 调节高压旁路改变进入中压缸蒸汽流量, 控制汽轮机的转速。

C4 对于具有多个主汽阀的汽轮机, 可以用其中一只主汽阀控制蒸汽流量, 其余全部关闭。

### 附录 D(提示的附录)国产典型机组动态参数

D1 国产典型机组转子转动惯量列于表 D1。

表D1 转子转动惯量  $\text{kg} \cdot \text{m}^2$

|     | 上海汽轮机厂<br>125MW | 东方汽轮机厂<br>200MW<br>(D09) | 哈尔滨汽轮机厂<br>200MW<br>三排气 | 上海汽轮机厂<br>300MW<br>905mm 叶片 | 哈尔滨汽轮机厂<br>300MW<br>900mm 叶片 | 哈尔滨汽轮机厂<br>600MW |
|-----|-----------------|--------------------------|-------------------------|-----------------------------|------------------------------|------------------|
| 设计值 |                 |                          |                         |                             |                              | (计算值)            |
| 实测值 | 8612~8992       | 12814.48                 | 12604                   | 28756~31053                 | 29567~31605                  | 49764.9          |

D2 国产典型机组转子时间常数列于表 D2。

表 D2 转子时间常数 s

|     | 上海汽轮机厂<br>125MW | 东方汽轮机厂<br>200MW<br>(D09) | 哈尔滨汽轮机厂<br>200MW<br>三排气 | 上海汽轮机厂<br>300MW<br>905mm 叶片 | 哈尔滨汽轮机厂<br>300MW<br>900mm 叶片 | 哈尔滨汽轮机厂<br>600MW |
|-----|-----------------|--------------------------|-------------------------|-----------------------------|------------------------------|------------------|
| 设计值 | 7.0             | 6.28                     | 6.24                    |                             |                              | (计算值)            |
| 实测值 | 6.8~7.1         | 6.2                      | 6.22                    | 9.329~10.216                | 9.727~10.135                 | 8.186            |

D3 国产典型机组蒸汽容积时间常数列于表 D3。

表 D3 蒸汽容积时间常数

s

|      | 上海汽轮机厂<br>125MW | 东方汽轮机厂<br>200MW<br>(D09) | 哈尔滨汽轮机厂<br>200MW<br>(三排汽) | 上海汽轮机厂<br>300MW<br>(905mm 叶片) | 哈尔滨汽轮机厂<br>300MW<br>(900mm 叶片) | 哈尔滨汽轮机厂<br>600MW |
|------|-----------------|--------------------------|---------------------------|-------------------------------|--------------------------------|------------------|
| 计算值  | 0.264           | 0.21                     | 0.22                      |                               |                                | 0.417            |
| 反运算值 | 0.258           | 0.18                     | 0.151~0.196               | 0.215                         | 0.295~0.346                    |                  |
| 推荐值  | 0.264           | 0.18~0.21                | 0.20~0.22                 | 0.22~0.25                     | 0.30~0.35                      |                  |

附录 E(提示的附录)常规法与测功法甩负荷试验方法的特点

表 E 常规法试验与测功法试验方法特点

| 序号 | 项 目  | 常 规 法  | 测 功 法  |
|----|------|--|--|
| 1  | 试验目的 | 直接测取汽轮机调节系统动态特性  | 间接测取机组甩负荷瞬时最高转速  |
| 2  | 适用范围 | 1)汽轮机调节系统考核试验或验收试验;<br>2)适用于首台新型机组或经改造后的机组   | 1)汽轮机调节系统验收试验;<br>2)适用于已用常规法进行过甩负荷试验的同型其他机组;<br>3)可间接测取调节系统失控条件下的危急超速最高转速;<br>4)机组大小修前后的校核试验                         |
| 3  | 试验条件 | 1)申请试验取得电网调度同意,计划安排试验时间;<br>2)解除大联锁保护、锅炉水位自动和保护等;<br>3)改变机、炉和辅助设备的运行方式(锅炉燃烧、给水系统、厂用电、除氧器运行方式等)           | 1)利用计划停机机会,停机、试验一并进行;<br>2)不需解除联锁保护等,无需过多的临时措施;<br>3)不需要改变机、炉和辅助设备的运行方式,按停机处理  |
| 4  | 试验方法 | 1)机组与电网解列,转速飞升,调节汽门关闭,记录汽轮机转速变化过渡过程;<br>2)试验按甩 50%、100%额定负荷两级进行;<br>3)以转速飞升至转速稳定或转速飞升至危急保安器动作(不合格)为试验的终结 | 1)机组不与电网解列,手操保护动作关闭调节汽门,机组转速不飞升,记录发电机有功功率变化过渡过程;<br>2)试验可不分级,直接进行甩 100%额定负荷试验;<br>3)以有功功率降至零(出现逆功率)或不能降到零(不合格)为试验的终结 |
| 5  | 试验结果 | 1)由转速飞升曲线直接测取调节系统动态参数(包括瞬时最高转速);<br>2)试验结果具有一定的精度;<br>3)可以全面地考核调节系统特性,评定调节系统运行的安全性                       | 1)已知转子转动惯量,根据功率变化曲线,经计算间接得到瞬时最高转速,其结果基本上覆盖了调节系统的动态性能;<br>2)试验结果转速偏高,对验收试验更安全。必要时可采取修正措施减少偏差;<br>3)可以评定调节系统运行的安全性     |
| 6  | 特 点  | 1)直接、全面、成熟、规范、精度高;<br>2)考核汽轮机调节系统的标准试验方法   | 1)机组不与电网解列、不升速,相对安全;试验方法简单、操作简便;间接测取瞬时最高转速,与常规法相比,转速略高;<br>2)可作为调节系统验收、校核试验的方法                                       |