

基于故障树 DTBJ 热电厂建设工程风险管理

1 工程概况

1.1 厂址选择及厂区布置

DTBJ 热电厂建设工程位于陕西省宝鸡市陈仓区千河镇宋家庄的千河西岸，距城市中心约 12km，距陈仓区约 7km。厂址地貌属于千河Ⅰ级阶地，为建设留用地，根据水源状况、灰场用地、出线方式等条件规划布置厂区平面。厂址用地范围内自然地面最高高程为 437.6m 和 440.3m，最低高程 391.6m，高差 51.3m~52.4m，场地边缘山体坡度达 13% 以上。沟谷顺向坡缓、倾角约 31°，反向坡陡、倾角约 44°，局部地段接近于直立，底宽 20m~50m。勘测范围内地面标高 393~456m，最大高差近 60m。

对于 DTBJ 热电厂建设工程，厂区的布置方案如下。贮煤场布置在厂区东侧，其西侧紧邻主厂房。采用这样的布置既方便燃煤经输煤栈桥送入主厂房，也便于运煤车辆进入电厂。再向西侧依次为冷却塔和升压站，升压站为架空线路方式，向西出线。主厂房布置采用汽机房——除氧间——煤仓间——锅炉房——布袋除尘器——引风机室——烟囱——炉后烟气脱硫岛的型式。锅炉采用岛式布置，紧身封闭，汽轮发电机组按纵向顺列布置，汽轮机机头朝向固定端，两机一控。主厂房南侧为供水设施，北侧为污水处理站和制氢站。厂区北部布置点火油泵和储油罐。

电厂布局充分考虑了安全和生产需要，对使用功能按照危险等级做了分区处理，有效控制了危险源，降低了事故发生概率和损失影响范围。

1.2 任务构成与管理体系

(1) 工程的任务构成

工程的任务构成见图 1。由图可见，DTBJ 热电厂 2×100 万千瓦级机组扩建工程主要包括建筑工程施工和安装调试工程，其中，建筑工程施工具体任务构成如下：

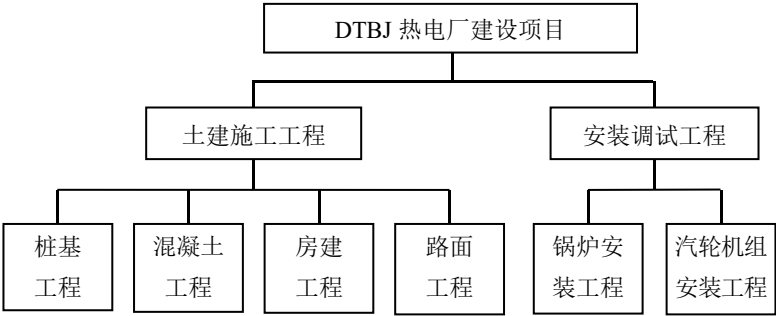


图 1 DTBJ 热电厂建设项目任务构成图

- 桩基工程：将上部结构较大的荷载通过较弱地层，传至深部较坚硬的、压缩性小的土层或岩层，本桩基工程采用灌注混凝土桩。
- 混凝土工程：该工程的混凝土工程是指各建筑结构的基础，其要点在于提高混凝土的抗冻和耐腐蚀性能。

- 房建工程：包括汽机房、除氧间、煤仓间、锅炉房、引风机室、除尘器、烟囱及外构筑物等。
- 路面工程：随着一、二期项目建成投产，进厂公路已经修好，厂区道路大部分也已在二、三期项目建设时建成，三期工程只需增加扩建道路、炉后通道、消防道路及其它少量道路。

安装调试工程具体包括如下内容：

- 锅炉安装工程：采用超临界参数变压运行螺旋管圈直流炉，为单元制，安装过程中需要重型设备吊装。
- 汽轮机组安装工程：安装 2×100 万千瓦级汽轮机组，并经调试保障能够正常起停机。

（2）工程的管理体系

DTBJ 热电厂建工程的管理体系如图 2 所示。其中，项目的法人单位是大唐陕西发电有限公司，建设管理单位是大唐陕西发电有限公司，现场管理单位是 DTBJ 热电厂项目部，工程设计单位是陕西大唐新能电力设计有限公司，工程监理单位是西北电力设计院，工程施工单位为大唐陕西发电技术工程有限公司。在项目的管理体系中，项目经理向上对监理单位、建设单位和施工单位负责，向下主管安全部、技术部、生产部、质检部和材供部，安全部主要负责现场安全措施的布置，以及检查、纠正现场作业人员的违章行为；技术部就设计、施工等工作进行现场指导；生产部负责安排人员、洽谈合同和控制进度；质检部跟踪检查施工和调试质量；材供部提供材料、设备、工具。下设三个组：土建施工组、安装调试组和工程验收组，分别承担土建施工、安装调试及工程验收的具体工作。

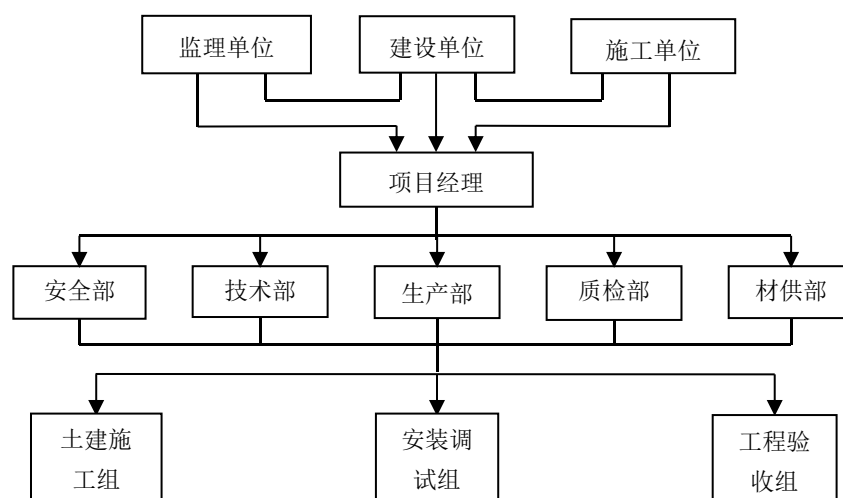


图 2 DTBJ 热电厂建设项目管理体系图

1.3 施工内容及流程

按照施工的技术要求，DTBJ 热电厂建设工程的施工流程为“土建施工→安装调试→设备试运行→启动调试及试生产→工程验收”。现将上述流程中各步骤的主要施工内容介绍如下。

（1）土建施工

土建施工工程主要包括主厂房、水塔、烟囱、煤场、灰场、道路、地下设施等，施工内容主要有施工测量、桩基和地基工程、主体工程、外围工程等。主厂房的施工内容主要有主体工程、电气工程、给排水工程和消防工程等。项目主厂房汽机房跨度 30.8m，纵长 89.7m；

除氧间跨度 10m，纵长 89.7m；煤仓间跨度 12m，纵长 70.0m。底层标高为 0.00m，低加热水器层 6.8m，高加热水器层 14.5m，除氧器层标高 24.3m，吊车轨顶标高 25.8m，汽机屋架下弦标高 28.9m，皮带层 41.0m。一般的施工程序是：地基施工——桩基及混凝土施工——钢结构施工——地面施工——厂房施工——上下水——消防——照明——通风——装饰工程施工及其他。DTBJ 热电厂三期扩建项目的选址紧邻一、二期工程，其施工要求在不影响已建成机组正常运行的情况下进行，再加上电厂建设具有其特殊性，对建筑工程施工提出了更高更细的要求。

工程基础中的大体积砼工程量为 7240m³，占混凝土总量 25547m³ 的 28.7%；钢结构工程量大，楼层钢梁、钢煤斗及钢板梁 1689t；预埋铁件品种规格多样，除氧煤仓间跨度 8.94m，铁件总量 115t。桩基工程中控制桩的埋设参数如图 3 所示。控制点的埋设深度应根据实际情况确定，但为增加其稳定性，至少不得低于 0.8m；为避免控制桩被破坏，应砌 0.3×0.3×0.26m 砖结构加以围护，并作出醒目标志。

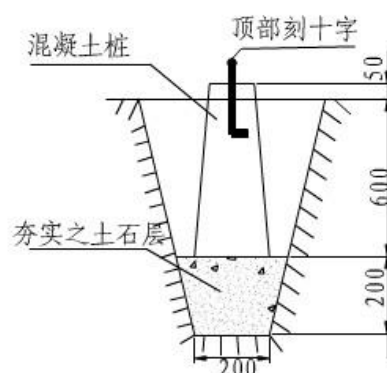


图 3 控制桩的埋设参数

(2) 安装调试

安装调试工程是整个项目的重中之重，其内容主要有：

- 锅炉本体及附属设备安装，主要包括钢架、过热器、水冷壁、再热器、引风机、磨煤机、燃烧和除灰装置、管道设备的安装等。
- 汽轮发电机组安装，主要包括汽轮机、发电机、凝汽器、加热器、冷油器和主油箱等设备的安装。
- 燃煤系统安装，主要包括皮带输送机、轨道、取料机和翻车机等设备的安装。
- 电气设备安装，主要包括升站和厂用站、综自系统、监控系统等设备的安装。
- 其他设备安装：主要包括供水系统、污水处理系统、通信系统、铁路专用线等设备的安装。

此外，安装调试工程还包括分步调试和启动调试工作。

工程吊装机械设备选用 300t.m 塔吊、50t 履带吊、40t 汽车吊进行吊装。另外，为了方便运输吊装，低压开关室与变压器联体共为一箱。开关室低压侧设出线仓位 4~7 个，每仓开关容量 600A。电缆埋深 300~400mm，过道处及地面将有重物堆放处电缆埋深不小于 0.8m。在电缆的引出端、终端、中间接头等处，每隔 50 米和走向有变化的部位埋设混凝土标示牌。直埋电缆与电杆基础边线、排水沟的平行间距应大于 2m，与构建筑物基础边线间距应大于 0.6m，与热管道平行间距应大于 2m，交叉间距应大于 0.6m，与其它管道平行间距应大于 0.6m。

(3) 设备试运行

设备的试运行主要包括如下内容：

- 电气及控制系统实验。

- 转动机械运行实验。
- 主机部分系统运行实验，分为锅炉系统化学清洗实验、循环水系统运行实验、管道系统运行实验、机组的油系统运行实验、炉膛及烟风系统运行实验等。
- 辅助系统运行实验，分为除灰系统运行实验、污水处理系统运行实验、空气压缩系统运行实验及输煤系统运行实验等。
- 大型排水系统运行实验。
- 大型闸板、阀门的整定和启闭实验。
- 大型起重设备的试运行等。

在进行上述各项设备运行实验时，实验过程和结果应满足相应的技术标准要求。

(4) 启动调试及试生产

此阶段是风险最高的阶段，对整套发电机组进行启动、调整实验和整体试运行，以达到生产运行的标准。试生产是为了考核机组在各种条件下的运行和调试工况，是机组整套启动调试和试运行后，正式投入运行前的一个阶段。按照相关规定，试运行期为半年，这是投产准备的一个重要环节。

(5) 工程验收

工程验收是工程建设的最后一个环节，是指通过整套机组启动调试和试运行，全面检验主机及其配套系统的施工和安装质量之后，按照国家规定，正式进行的、并由各相关方共同参加的正式验收活动。

1.4 技术要求及主要参数

(1) 技术要求

现代热电厂建设属于大型基础建设项目，以大机组、大规划容量、高电压、高自动化占主流，投资规模大，技术条件复杂，涉及的专业多，建设周期长，是一个十分复杂的系统工程。该工程应满足以下主要的技术要求如下：

- 基础混凝土表面应平整，无裂纹、孔洞、蜂窝和露筋等缺陷。
- 螺栓孔内须清理干净，螺栓孔中心线对基础中心线偏差不大于 $0.1d$ ，且小于 10mm ，螺栓孔壁的铅垂直度偏差不大于 $L/200$ 且小于 10mm 。
- 直埋式预埋地脚螺栓的材质、型号和标高，都应符合图纸要求，螺栓及铁件中心偏差应不大于 2mm ，铅垂偏差应小于 $L/450$ ，铁件标高偏差应不大于 5mm ，地脚螺栓标高偏差应不大于 $\pm 4\text{mm}$ 。
- 设备下部的混凝土承力面以及发电机的混凝土风道顶部等处的标高，应与图纸相符，偏差在 $0\sim 10\text{mm}$ 范围内。
- 埋设在地下的套管形式的疏水管道，应在安装前进行工作压力 1.5 倍的密闭性水压试验。
- 进油管应向油泵侧有 $1/1000$ 的坡度，回油管应向油箱侧倾斜，坡度不小于 $5/1000$ 。
- 汽封径向间隙应按照规定，汽轮机左右两侧各为 $0.5\sim 0.7\text{mm}$ 为宜，上下侧间隙应考虑轴瓦油膜厚度的影响，上侧为 $0.5\sim 0.7\text{mm}$ ，下侧为 $0.8\sim 0.9\text{mm}$ ，高压缸内侧宜取上限，外侧间隙可稍小。

工程从立项到前期工作准备，再到征地、五通一平、施工、调试至移交生产，需要严密而科学的运筹。

(2) 主要参数

本项目锅炉及汽轮机组主要参数见表 1 及表 2 所示。对于安装调试工程来说，风险最为集中的阶段为设备调试和机组试运行，此阶段由于受到多方面条件的影响，容易发生事故。汽轮机组经过调试运行，满足各项指标，工程移交给生产单位后，安装调试工程才能宣告结

束。

表 1 锅炉外形尺寸主要参数

项目	尺寸(mm)
炉膛宽度×深度	23160×23160
上排燃烧器至屏底距离	26630
下排燃烧器至冷灰斗上沿距离	5237
上下一次风喷口距离	21137
相邻层燃烧器间距	1612
水冷壁下集箱标高	4210
炉顶管标高	118190
大板梁顶标高	127140
锅炉宽度(锅炉构架范围)	53512
锅炉深度(锅炉构架范围)	63434
中间过渡集箱标高	68072

表 2 汽轮机组主要参数

机组功率(型式)	部套	参数
1000MW(CC4F-41)	高压缸、中压缸	24.5MPa, 600℃ / 600℃, 背压 4.27kPa
1000MW(CC4F-41)		24.5MPa, 600℃ / 600℃, 背压 5.09kPa

2 风险的分类及案例的统计分析

2.1 风险的分类

根据以上对 DTBJ 热电厂建设工程的任务构成、管理体系、施工内容及流程、技术要求的介绍和分析，结合一、二期工程的施工建设经验，可以初步预测出该工程在实施过程中可能遇到的风险如下所述。

（1）技术风险

技术风险的种类很多，其主要类型是技术不足风险、技术开发风险、技术保护风险、技术使用风险、技术取得和转让风险。本工程项目主要涉及的是技术不足风险和技术使用风险，而这些风险又由土建施工风险和安装调试风险两大因素构成。其中，土建施工风险主要包括桩基深度不合适、由于气温因素引起的混凝土裂缝、房屋建筑质量不合格、路面塌陷；而安装调试风险则主要由设备或人为因素引起。

（2）安全风险

安全生产在工程项目管理中占有特殊的地位，有安全才能有生产。但是，在整个生产过程中，由于各种不确定因素的存在，必然伴随着安全风险。在本工程项目中，安全风险主要有 人身伤害风险和 设备损坏风险两类，这两类风险都有着高危性质，无论是人身伤害还是设备损坏，都会对项目本身产生巨大影响，轻则导致工期延误等，重则影响整个项目的正常进行。所以，必须对安全风险给予足够的重视，并制定出有效的防范措施。

（3）工期风险

工程因不确定因素造成工期延误的现象即为工期风险。工程项目的实施受到时间、资金及内外部环境的限制，而其中时间限制则是项目管理者必须考虑的重要内容。本工程项目的

工期风险主要有工期安排风险和施工因素风险两种。由于项目工期安排不合理，可能引起停工待料、工期滞后，即为工期安排风险；而施工过程中，由于材料、技术、环境、人为等因素引起的工期延误，这种风险因素即为施工因素风险。

（4）环境风险

环境风险包括政策环境风险和自然环境风险两类。政策环境在工程项目的运行中起着重要作用，如果对政策环境把握不准或失误，就会产生政策环境风险，进而对工程带来损失，甚至会导致工程无法正常进行。而自然环境风险属于不可抗力，会对工程项目造成影响，所以，也应采取相应对策来将自然环境风险的负面影响降到最低。

（5）管理风险

工程建设项目规模庞大，涉及多方面错综复杂的因素，如果不对这些因素加以协调和控制，就会影响项目的正常进行。本工程的工程风险主要有现场组织风险和材料供应风险两种，现场组织好各项工作，可以使安全 and 生产都有良好的保障；协调好材料的供应，可以确保工期不延误，确保工程项目按质按量完成。

进一步对上述风险进行解剖并分析其产生的后果，得到的结果汇总见表 3。根据表 3 绘制的 DTBJ 热电厂建设工程风险分类结构如图 4 所示。由该图可见，DTBJ 热电厂建设工程的风险有 5 大类，分别是技术风险、安全风险、工期风险、环境风险和管理风险。而技术风险又可进一步分为土建施工风险和安装调试风险；安全风险分为人身伤害风险和设备损坏风险；工期风险分为工期安排风险和施工因素风险；环境风险分为政策环境风险和自然环境风险；管理风险分为现场组织风险和材料供应风险。

表 3 项目风险清单表

序号	风险种类	风险因素	产生后果
1	技术风险	土建施工风险	桩基深度不合适、混凝土裂缝、房屋建筑质量不合格、路面塌陷等
		安装调试风险	引起设备运行事故或者不能正常投入生产运营
2	安全风险	人身伤害风险	在施工中人员被重物砸伤，高空摔伤，有时在锅炉和机组测试时会发生事故，影响人身安全
		设备损坏风险	在施工和安装过程中，尤其是吊装期间和试车期间，可能会造成如锅炉、汽轮机组等设备损坏，产生较大损失
3	工期风险	工期安排风险	工程计划安排不合理，无法按计划完成工程
		施工因素风险	因施工中各方面因素导致工期延误
4	环境风险	政策环境风险	对工程造成损失或工程无法进行
		自然环境风险	造成一些工作无法开展，或增加工程投入，造成进度受阻，成本增加
5	管理风险	现场组织风险	造成资源浪费，增加工程投入，影响进度
		材料供应风险	可能造成工期延误

2.2 风险案例的统计分析

为了更为准确地识别和分析 DTBJ 热电厂建设项目在实施过程中可能遇到的风险因素，在上述对风险因素进行初步识别的基础上，还收集了自 DTBJ 热电厂一、二期工程建设开工以来实施的所有项目，并对项目在土建施工和安装调试中所出现的各种风险事件进行统计，

最终整理出风险事件案例 45 个。同时进一步归纳出这些风险事件所属的阶段、发生现象及风险因素形成环节，并剖析了这些风险因素产生的原因，最终得到的项目风险案例统计和分析结果见表 4。

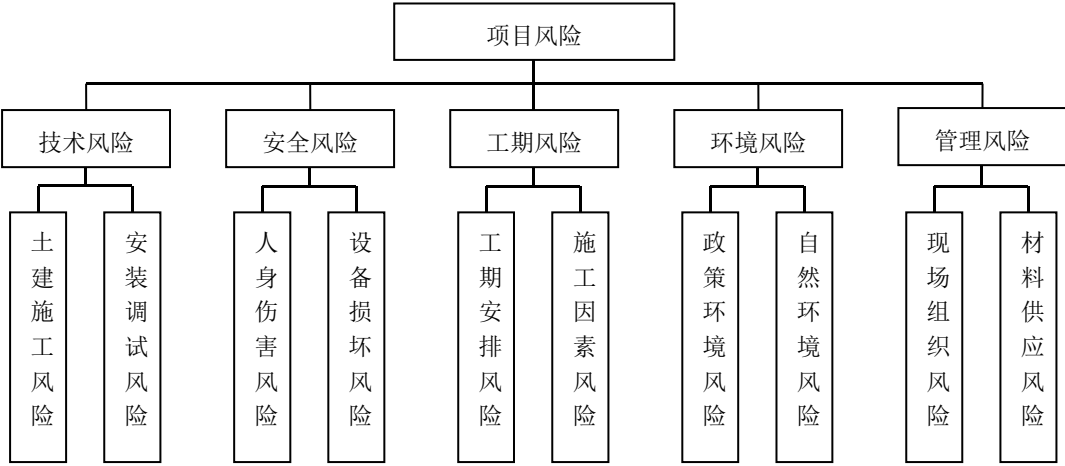


图 4 DTBJ 热电厂建设项目风险分类图

表 4 DTBJ 热电厂建设项目风险因素统计表

编号	所属 工期	现象	阶段	时间	主要原因	形成风险的 环节	风险 种类	主要风 险因素
1	二期	所吊物件 脱落	施工 中	2010.09	超载作业	行车、吊车、 起重机作业	技术风 险	土建施工 风险
2	一期	旋转滤网 安装受影 响	施工 中	2008.12	设备吊装不符安全 要求	循泵、旋转 滤网检修	技术风 险	安装调试 风险
3	一期	管理失误	施工 中	2009.02	管理者给定的路径 和设备安装与实际 情况不符	管道敷设	协调风 险	现场组织 风险
4	二期	人员被砸 伤	施工 中	2010.01	大车行走时作业区 域内有人停留或工 作	大车行走过 程中	安全风 险	人身伤害 风险
5	二期	工期延误 10 天	施工 中	2009.11	临时脚手搭设不 当，拆解后重新搭 设	土木作业	工期风 险	施工因素 风险
6	一期	存在局部 塌陷现象	施工 中	2009.04	楼台楼板不符要求	生产区域楼 台楼板检修	技术风 险	土建施工 风险
7	二期	承压部件 焊接失误	运行 中	2010.05	未按照安全规程作 业，违章操作	带压对锅炉 承压部件焊 接、捻缝、 紧螺丝等作 业	技术风 险	安装调试 风险
8	一期	达不到施 工条件	施工 中	2008.12	气温偏低，材料的 硬度和脆性增加，	管道敷设过 程中	环境风 险	自然环境 风险

					容易造成外护套开裂和绝缘损伤			
9	一期	大车行走受限	施工中	2009.05	井、坑、孔、洞或沟道没有覆以地面齐平盖板	路面施工过程中	技术风险	土建施工风险
10	二期	斗轮机损坏	施工中	2010.04	斗轮机与推扒机配合作业时安全距离不足	煤场堆、取煤作业	技术风险	土建施工风险
11	二期	人员被挂伤	施工中	2009.11	工器具捆绑不牢	高空作业	安全风险	人身伤害风险
12	一期	承压部件爆泄	竣工验收	2009.10	材料质量不合格	材料的保管	技术风险	土建施工风险
13	一期	转动机械飞车	运行中	2008.11	泵、风机等转动机械故障	转动机械检修	技术风险	安装调试风险
14	二期	压力容器超压损伤	运行中	2010.09	实验过程中水压过大	锅炉的水压试验	技术风险	安装调试风险
15	一期	汽轮机飞车	运行中	2009.06	高速运转	试运行检修	技术风险	安装调试风险
16	一期	升降机构运行失控	施工中	2008.08	小车开闭、升降机构电气故障	码头卸煤运行作业	技术风险	土建施工风险
17	二期	皮带机损坏	运行中	2010.05	皮带机紧停装置故障	输煤皮带的运行作业	安全风险	设备损坏风险
18	二期	油漆作业验收不合格	竣工验收	2010.06	油漆作业不符合作业规范	油漆作业	技术风险	土建施工风险
19	一期	调整系统报警	运行中	2009.03	温度过高,孔洞未封堵	汽轮机本体及调整系统检修	技术风险	安装调试风险
20	二期	水泵运行相关值较低	运行中	2009.09	阀门隔离不严	水泵、风机检修作业	技术风险	安装调试风险
21	一期	照明不符合规定要求	施工中	2008.06	未按规定要求作业	照明检修及维护作业	技术风险	土建施工风险
22	一期	气温偏低,不符合敷设条件	施工中	2009.01	当日室外温度很低,温度为-10℃,管道材料延展性受限,材料的硬度和脆性增加,不符合施工条件	管道敷设	环境风险	自然环境风险
23	二期	汽轮机的辅助设备无法正常运行	运行中	2010.04	转动机械故障	汽轮机的辅助设备调试	技术风险	安装调试风险
24	一期	未能按期	运行	2009.05	制氢设备安措不完	制氢设备的	技术风	安装调试

		进行调试	中		善	运行操作及检修作业	险	风险
25	一期	卸煤机受损	施工中	2008.11	换舱或移舱作业倒机作业时卸煤机驾驶室碰撞上驾驶台	码头卸煤运行作业	技术风险	土建施工风险
26	二期	设备损坏风险	施工中	2009.07	电缆输送机的电动机烧毁	电缆牵引敷设过程中	安全风险	设备损坏风险
27	一期	防护外壳烧毁	施工中	2008.09	电气设备故障	热力设备运行作业	技术风险	安装调试风险
28	一期	系统失效未动作	竣工验收	2009.10	蒸汽灭火系统故障	蒸汽灭火系统检测	技术风险	安装调试风险
29	二期	未能实施检修后的相关作业	施工中	2010.01	安措不到位	检修后的锅炉热紧法兰等处的螺丝作业	技术风险	安装调试风险
30	二期	混凝土工程未按期完工	施工中	2010.04	1号厂房混凝土工程施工时间安排过短,无法按期完成	混凝土工程施工	工期风险	工期安排风险
31	一期	不符合投运标准	施工中	2009.04	通风不良,粉尘超标	水冷壁管的检修作业	技术风险	安装调试风险
32	一期	煤堆坍塌造成车辆倾翻	施工中	2008.12	煤场堆放方式不正确,遮挡操作员视线	煤场推煤作业	技术风险	土建施工风险
33	二期	轻微触电事故	施工中	2010.03	绝缘工具不良	电气设备操作	安全风险	人身伤害风险
34	一期	电气设备故障	运行中	2009.09	温度过高	热力设备运行作业	安全风险	设备损坏风险
35	二期	工期延误15天	施工中	2009.11	锅炉耐压试验没有通过,压力故障查找,寻找困难,导致延误工期,同时工作计划没有很好地进行修正	锅炉耐压测试	工期风险	施工因素风险
36	一期	工期延误,窝工停产	施工中	2008.07	由于要涉及开挖绿化带,手续办理困难,受阻停工27天	土木作业过程中	环境风险	政策环境风险
37	二期	材料供应出现差错	施工中	2009.12	管理不善,协调不力,导致材料出现疏漏,严重影响施工	土木作业	协调风险	材料供应风险
38	一期	转子正常运行受到影响	运行中	2009.07	检修操作不当	转子检修	技术风险	安装调试风险
39	一期	设计与施工脱节	运行中	2008.12	设计变更未及时通知施工人员,造成	电气设备接地安装中	协调风险	现场组织风险

					返工现象严重			
40	二期	锅炉承压设备的泄漏检测结果不合格	运行中	2010.01	通风不良	锅炉承压设备的泄漏检修	技术风险	安装调试风险
41	二期	牵引设备绞磨机损坏	施工中	2009.11	牵引设备超负荷工作, 致绞磨机损坏	设备固定过程	安全风险	设备损坏风险
42	一期	影响锅炉正常运行	运行中	2009.05	排污口不畅, 导致无法进入正常运行状态	锅炉排污作业	技术风险	安装调试风险
43	二期	未找到电缆外护套破损点, 延误工期	施工中	2009.09	外护套故障测寻不准确	电气设备电缆外护套耐压测试	工期风险	施工因素风险
44	二期	卸煤机发生故障停运	运行中	2009.08	现场风速超过卸煤机安全作业风速时继续作业	码头卸煤运行作业	技术风险	土建施工风险
45	一期	工期延误	施工中	2008.09	卸煤机钢丝绳更换过程中操作人员造作不当受伤, 要求赔偿金额不能达成一致, 导致工期延误 6 天	卸煤机钢丝绳更换	工期风险	施工因素风险

根据前面所建立的风险分类结构, 对上述案例进行归纳总结, 得到的统计结果见表 5。由表中的数据可以看出, DTBJ 热电厂建设工程中的技术风险发生的频数最大, 在收集的 45 个案例中发生质量风险的案例就有 27 个, 占总频数的 60.0%, 说明技术风险是 DTBJ 热电厂建设项目的风险因素。而在技术风险中, 安装调试风险发生的频数比较高, 所以, 应重点对该工程中的安装调试风险进行分析和控制。

表 5 DTBJ 热电厂建设项目风险统计表

风险种类	技术风险		安全风险		工期风险		环境风险		协调风险	
风险因素	土建施工风险	安装调试风险	人身伤害风险	设备损坏风险	工期安排风险	施工因素风险	政策环境风险	自然环境风险	现场组织风险	材料供应风险
发生频数	11	16	3	4	1	4	1	2	2	1
频数合计	27		7		5		3		3	
占百分比	60.00%		15.50%		11.10%		6.70%		6.70%	

3 基于故障树的工程安装调试风险分析

根据前面的分析可以得出结论，技术风险是影响工程施工最重要的风险，而在技术风险中，安装调试风险又最为重要。为此，利用故障树方法对 DTBJ 热电厂建设工程的安装调试风险进行深入分析，找到其最底层的影响因素，以便为风险的控制提供依据。

3.1 安装调试风险故障树建立

建立故障树是故障树分析的第一步，也是最为重要的关键一步。作为后续定性及定量分析的对象，故障树的完善程度将直接影响分析结果的准确性，而其化简程度则关系到分析的工作量，也影响故障树的直观性。在 DTBJ 热电厂建设工程安装调试过程中，影响安装调试的底层因素很多，当有些底层因素发生时，其后果是导致工程不能通过压力测试，达不到验收的标准要求；而当另一些底层因素发生时，会造成工程不能通过汽轮机组高温高压试验，引起测试运行事故；等等。通常，这些底层风险因素都是潜在的，不易或无法及时发现，但其一旦发生将造成不同程度的损失，对工程的成功产生不良的影响。针对这些风险因素，可以通过详细、系统和深入的分析，来建立 DTBJ 热电厂建设工程安装调试风险故障树，借助于故障树，便可以完成对造成安装调试风险各种因素的全面系统的分析。

根据对 DTBJ 热电厂建设工程安装调试过程影响因素的梳理分析，按照故障树的构建原则，绘制出的 DTBJ 热电厂建设工程安装调试风险故障树如图 5 所示。由图可见，该故障树共包括 28 个中间事件，54 个基本事件，包括 26 个逻辑“或门”，3 个逻辑“与门”。基本事件符号和名称见表 6。

表 6 基本事件符号和名称

符号	基本事件名称	符号	基本事件名称	符号	基本事件名称
X1	四管磨损	X19	短路事故	X37	烧毁
X2	四管疲劳	X20	局部放电	X38	发生故障
X3	四管过热	X21	堵塞漏水	X39	过负荷
X4	四管腐蚀	X22	接头事故	X40	失磁
X5	四管质量缺陷	X23	导线断股	X41	断裂
X6	压力过低或过高	X24	断水	X42	温度高
X7	纯度过低	X25	局部固有频率振动	X43	震动大
X8	温度过低或过高	X26	片间绝缘损坏	X44	冷却机漏水
X9	湿度过高	X27	局部压装变松	X45	结露
X10	氢气爆炸	X28	压装变松	X46	导线磨损
X11	轴承发热	X29	电阻温度计损坏	X47	导线腐蚀
X12	进出口导叶和叶轮磨损	X30	匝间短路	X48	密封瓦温度过高
X13	轴承轴瓦运行温度过高	X31	转子绕组漏水	X49	密封瓦烧毁
X14	串轴现象发生	X32	转子绕组接地	X50	密封瓦漏油
X15	发电机鼠笼转子断条	X33	过热变形	X51	密封环磨损
X16	电气开关和保护引发风机跳闸	X34	部分水路堵塞	X52	密封环漏油
X17	热工保护和其他连锁引发风机跳闸	X35	负序电流引起的损坏	X53	设计制造结构不合理
X18	进口导叶执行机故障引发风机负荷摆动	X36	护环裂开	X54	运行调整不当产生喘振

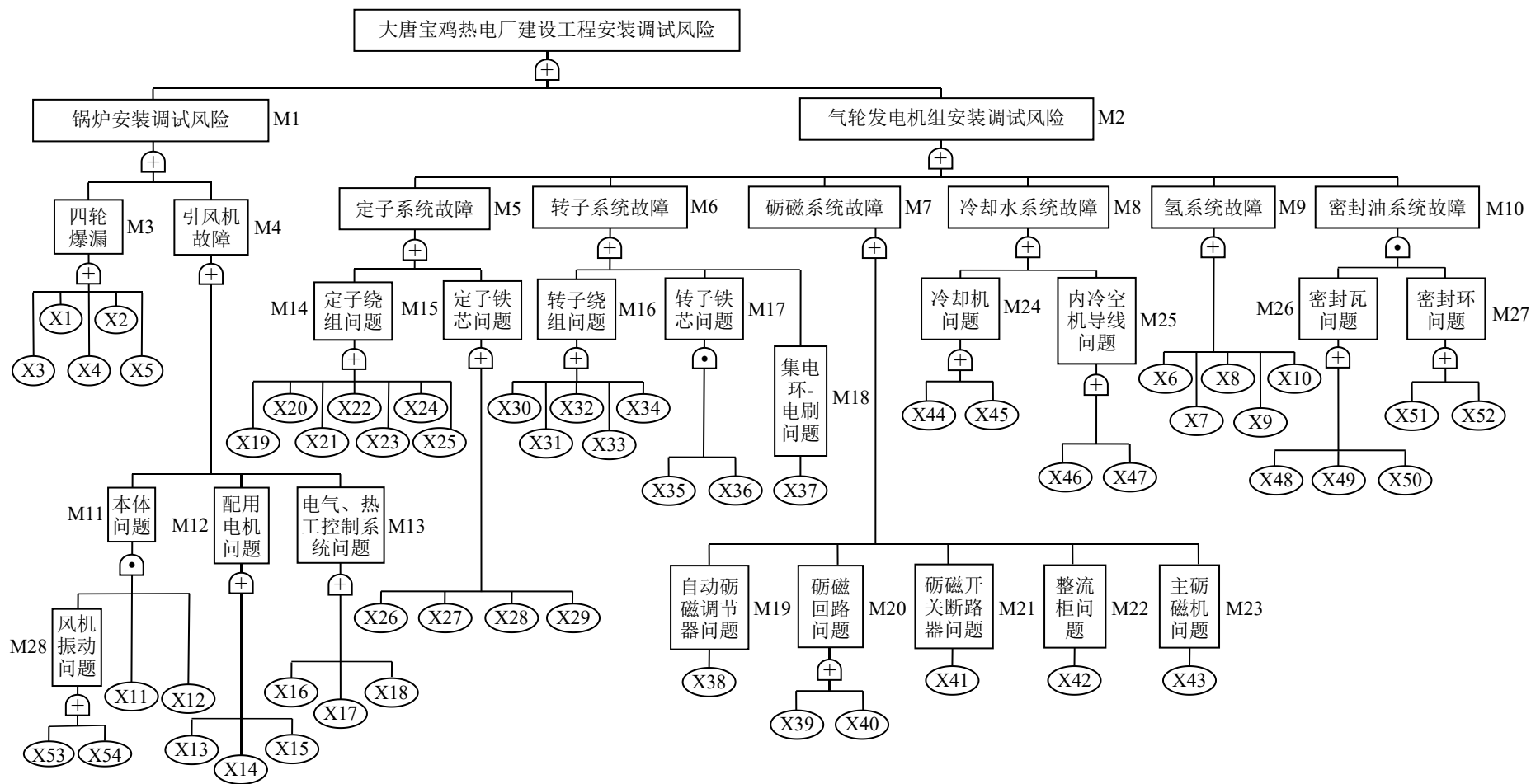


图 5 DTBJ 热电厂建设项目安装调试风险故障树图

依据图 5 所示的故障树，可以对 DTBJ 热电厂建设工程安装调试风险的详细说明如下：

(1) 顶上事件

故障树分析是对在安装调试过程中可能发生的风险，按因果关系进行层层分解，因此，把“DTBJ 热电厂建设工程安装调试风险”作为顶上事件。

(2) 第二层事件

引起顶上事件“DTBJ 热电厂建设工程安装调试风险”的主要因素包括“锅炉安装调试风险”和“汽轮发电机组安装调试风险”两个方面，而且这两个因素中的任何一个发生，均会导致顶上事件的发生，所以，第一层逻辑门采用“或门”连接。

进一步分析引起“锅炉安装调试风险”、“汽轮发电机组安装调试风险”的主要因素。“锅炉安装调试风险”主要是由于“四管爆漏”或“引风机故障”造成的，因此，二者采用“或门”连接；“汽轮发电机组安装调试风险”主要是由于“定子系统故障”、“转子系统故障”、“励磁系统故障”、“冷却水系统故障”、“氢系统故障”或“密封油系统故障”造成的，这些因素中只要有一个发生，“汽轮发电机组安装调试风险”就会发生，因此它们之间也为“或门”关系。

(3) 第三层事件

接下来分析引起第三层事件“四管爆漏”、“引风机故障”、“定子系统故障”、“转子系统故障”、“励磁系统故障”、“冷却水系统故障”、“氢系统故障”、“密封油系统故障”的产生因素。具体分析如下：

- 造成“四管爆漏”的主要原因是“四管磨损”、“四管疲劳”、“四管过热”、“四管腐蚀”、“四管质量缺陷”，这五个原因中的任何一个发生则就会发生“四管爆漏”，所以，它们之间是“或门”关系。
- “引风机故障”主要是由“本体问题”、“配用电机问题”或“电气、热工控制系统问题”引起的，它们之间是“或门”关系。
- 造成“定子系统故障”的主要原因包括“定子绕组”或“定子铁芯”，这两者之间为“或门”关系。
- 造成“转子系统故障”的主要原因是“转子绕组”、“转子铁芯”或“集电环-电刷”，这三个因素任何一个发生，就会发生“转子系统故障”，因此，这二者之间的关系为“或门”关。
- 引起“励磁系统故障”的主要原因是“自动励磁调节器”、“励磁回路”、“灭磁开关断路器”、“整流柜”或“主励磁机”，它们之间是“或门”关系。
- 引起“冷却水系统故障”的主要原因是“冷却机”或“内冷空心导线”，它们之间是“或门”关系。
- 引起“氢系统故障”的主要原因是“压力过低或过高”、“温度过低或过高”、“纯度过低”、“湿度过高”或“氢气爆炸”，这五者中的其中一个发生就会发生“氢系统故障”，因此，这三者之间关系是“或门”。
- 引起“密封油系统故障”的主要原因是“密封瓦”和“密封环”，在这两个因素的共同作用下就会发生“密封油系统故障”，因此二者的关系是“与门”。

(4) 第四层事件

接下来分析引起第四层事件的主要因素，具体如下：

- 造成“本体问题”的主要原因是“风机振动”、“轴承发热”、“进出口导叶和叶轮磨损”，当这三个因素同时发生时，就会发生“本体问题”，因此，这三者之间是“与门”关系。
- 引起“配用电机问题”的主要因素是“轴承轴瓦运行温度过高”、“串轴现象发生”或“发电机鼠笼转子断条”，这三者中其中一个发生就会发生“配用电机问题”，所以，它们之间的关系是“或门”关系。
- 引起“电气、热工控制系统问题”的主要原因是“电气开关和保护引发风机跳闸”、“热

工保护和其他连锁引发风机跳闸”或“进口导叶执行机故障引发风机负荷摆动”，这三者中任何一个发生，就会发生“电气、热工控制系统问题”，所以，它们之间为“或门”关系。

- 引起“定子绕组”的主要因素是“短路事故”、“局部放电”、“导线断股”、“接头事故”、“堵塞漏水”、“断水”或“局部固有频率振动”，这七个因素中的任何一个发生，就会发生“定子绕组”，因此，它们之间是“或门”关系。
- 引起“定子铁芯”的主要因素是“片间绝缘损坏”、“局部压装变松”、“压装变松”或“电阻温度计损坏”，这四个因素中的任何一个发生，就会发生“定子铁芯”，所以，它们之间是“或门”关系。引起“转子绕组”的主要因素是“匝间短路”、“转子绕组漏水”、“转子绕组接地”、“过热变形”或“部分水路堵塞”，这五个因素中的任何一个发生，就会发生“转子绕组”，它们之间是“或”关系；引起“转子铁芯”的主要因素是“负序电流引起的损坏”和“护环裂开”，因此，它们之间是“与门”关系。
- 引起“集电环-电刷”的主要因素是“烧毁”。
- 引起“自动励磁调节器”的主要因素是“发生故障”。
- 引起“励磁回路”的主要因素是“过负荷”或“失磁”，它们之间是“或门”关系。
- 引起“灭磁开关断路器”的主要因素是“断裂”。
- 引起“整流柜”的主要因素是“温度高”。
- 引起“主励磁机”的主要因素是“震动大”。
- 引起“冷却机”的主要因素是“冷却机漏水”或“结露”，它们之间是“或门”关系。
- 引起“内冷空心导线”的主要因素是“导线磨损”或“导线腐蚀”，它们之间是“或门”关系。
- 引起“密封瓦”的主要因素是“密封瓦温度过高”、“密封瓦烧毁”或“密封瓦漏油”，它们之间是“或门”关系。
- 引起“密封环”的主要因素是“密封环磨损”或“密封环漏油”，它们之间是“或门”关系。

(5) 第五层事件(基本底事件)

最后，分析引起第五层的原因“风机振动”。引起“风机振动”的主要原因是“设计制造结构不合理”或“运行调整不当产生喘振”，它们之间是“或门”关系。

3.2 故障树的定性分析

定性分析是通过求取故障树的最小割集，计算出底事件的结构重要度，以此分析事故发生的轻重缓急，从而为制定可行的风险预防控制措施提供支持，是故障树分析的重要内容之一。

(1) 故障树的最小割集

在故障树中，一组基本事件能造成顶上事件的发生，则该组基本事件的集合称为割集。能够引起顶上事件发生的最低限度的基本事件的集合称为最小割集。即如果割集中任一基本事件不发生，顶上事件就绝不会发生。采用布尔代数法，求取“DTBJ 热电厂建设工程安装调试风险”故障树的最小割集。对于该故障树来说，由 54 个底事件构成，与门关系可以表示为相应事件之积，或门关系可以表示为相应事件之和。由顶事件“DTBJ 热电厂建设项目安装调试风险”出发，按照布尔代数法逐步展开计算，得到一个由“或”关系组成的结果，即为该故障树的最小割集，如表 7 所列。

表 7 故障树的最小割集列表

序号	最小割集
1	{ X1}
2	{ X48, X52}

3	{ X13}
4	{ X49, X51}
5	{ X2}
6	{ X17}
7	{ X24}
8	{ X48, X51}
9	{ X29}
10	{ X15}
11	{ X21}
12	{ X32}
13	{ X5}
14	{ X4}
15	{ X11, X12, X53}
16	{ X19}
17	{ X26}
18	{ X3}
19	{ X14}
20	{ X22}
21	{ X18}
22	{ X50, X51}
23	{ X33}
24	{ X34}
25	{ X23}
26	{ X16}
27	{ X25}
28	{ X49, X52}
29	{ X28}
30	{ X45}
31	{ X37}
32	{ X20}
33	{ X31}
34	{ X47}
35	{ X30}
36	{ X50, X52}
37	{ X27}
38	{ X43}
39	{ X39}
40	{ X35, X36}
41	{ X44}
42	{ X46}
43	{ X11, X12, X54}
44	{ X42}

45	{ X41}
46	{ X38}
47	{ X40}

最小割集可直观比较各种故障模式的危险性。由表 7 可以看出，该故障树共有 47 个最小割集，说明造成顶上事件“DTBJ 热电厂建设工程安装调试风险”发生的可能性共有 47 种。当某一最小割集含有的基本事件越少，则这种故障模式越危险，可以看出，其中 39 种是由单个底事件发生所引起的，这种故障模式最为危险。即 X1（四管磨损）、X13（轴承轴瓦运行温度过高）、X2（四管疲劳）、X17（热工保护和其他连锁引发风机跳闸）、……、X40（失磁），这 39 个底事件所引发的 DTBJ 热电厂建设工程安装调试风险发生的危险性最高。

此外还有 6 种是由 2 个底事件同时发生引起的，这种故障模式的危险性次之。即 X48（密封瓦温度过高）和 X52（密封环漏油）同时发生；X49（密封瓦烧毁）和 X51（密封环磨损）同时发生、X48（密封瓦温度过高）和 X51（密封环磨损）同时发生；……；X35（负序电流引起的损坏）和 X36（护环裂开）同时发生时，所引发的 DTBJ 热电厂建设项目安装调试风险发生的危险性次之。

最后还有 2 种是由 3 个底事件同时发生引起的，这种故障模式的危险性最小，即 X11（轴承发热）和 X12（进出口导叶和叶轮磨损）和 X53（设计制造结构不合理）同时发生；X11（轴承发热）和 X12（进出口导叶和叶轮磨损）和 X54（运行调整不当产生喘振）同时发生时，所引发的 DTBJ 热电厂建设项目安装调试风险发生的危险性最小。

（2）底事件的结构重要度

结构重要度分析就是不考虑基本事件发生的概率是多少，仅从故障树结构上分析各基本事件的发生对顶上事件的影响程度。在某一故障树中，不同的底事件对顶事件产生的影响也不同。结构重要度有助于人们了解不同底事件的发生对顶事件发生的影响程度。结构重要度分析是通过计算各底事件的结构重要度系数，从而得出各底事件的重要程度。可以根据下式计算，其前提是已找出最小割集，之后可以对结构重要度系数进行排序，系数值越大，底事件发生对顶事件发生的影响程度也越大：

$$I_{\Phi(i)} = 1 - \prod_{x_i \in k_j} \left[1 - \frac{1}{2^{N_j-1}} \right]$$

式中： $I_{\Phi(i)}$ 为第 i 个底事件的结构重要度系数， k_j 为第 j 个最小割集， $x_i \in k_j$ 为第 i 个底事件属于第 j 个最小割集， $N_j(x_i \in k_j)$ 为包含有底事件 i 的 k_j 中的底事件的总数。根据该公式计算出的各底事件的结构重要度系数值见表 8。

表 8 底事件的结构重要度系数值

底事件	结构重要度
X1	0.0217392
X2	0.0217392
X3	0.0217392
X4	0.0217392
X5	0.0217392
X6	0.0217392
X7	0.0217392
X8	0.0217392
X9	0.0217392

X10	0.0217392
X11	0.0093785
X12	0.0093785
X13	0.0217392
X14	0.0217392
X15	0.0217392
X16	0.0217392
X17	0.0217392
X18	0.0217392
X19	0.0217392
X20	0.0217392
X21	0.0217392
X22	0.0217392
X23	0.0217392
X24	0.0217392
X25	0.0217392
X26	0.0217392
X27	0.0217392
X28	0.0217392
X29	0.0217392
X30	0.0217392
X31	0.0217392
X32	0.0217392
X33	0.0217392
X34	0.0217392
X35	0.0061353
X36	0.0061353
X37	0.0217392
X38	0.0217392
X39	0.0217392
X40	0.0217392
X41	0.0217392
X42	0.0217392
X43	0.0217392
X44	0.0217392
X45	0.0217392
X46	0.0217392
X47	0.0217392
X48	0.0351208
X49	0.0351208
X50	0.0351208
X51	0.0641063
X52	0.0641063

X53	0.0152816
X54	0.0152816

从表中可以看出，底事件 X51、X52 的结构重要度相等且最大，为 0.0641063。说明底事件“密封环磨损”和“密封环漏油”的发生对顶上事件“DTBJ 热电厂建设工程安装调试风险”的发生影响最大；底事件 X48、X49、X50 的结构重要度值也相等，结构重要度较大，为 0.0351208，说明底事件“密封瓦温度过高”、“密封瓦烧毁”和“密封瓦漏油”在系统中所处的地位也比较重要，对 DTBJ 热电厂安装调试风险的发生影响也比较大。底事件 X35、X36 的结构重要度值相等且最小，为 0.0061353，说明底事件“负序电流引起的损坏”和“护环裂开”对风险的发生影响最小。并且，可以发现这两个底事件之间是“与门”关系，即只有当“负序电流引起的损坏”和“护环裂开”同时发生时，才会导致顶上事件的发生，所以，这进一步减小了这两个底事件对于顶上事件发生的影响。

通过统计结构重要度最大和较大的底事件，可以向上找到相应的中间事件。X51（密封环磨损）、X52（密封环漏油）在故障树中所处的位置，是中间事件 M27(密封环问题)以“或门”连接的底事件；X48（密封瓦温度过高）、X49（密封瓦烧毁）、X50（密封瓦漏油）所处的位置，是中间事件 M26(密封瓦问题)以“或门”连接的底事件；而中间事件 M27(密封环问题)和 M26(密封瓦问题)之间的逻辑关系以“与门”连接。这说明在项目的安装调试过程中，对“密封环问题”和“密封瓦问题”要加强监控措施，对密封环和密封瓦的安装、调试、检测等工艺流程要严格按照相应规程进行，对存在的故障要及时排除，确保检测结果合格。

3.3 故障树定量分析

故障树定量分析的主要任务就是根据底事件的发生概率，求解顶上事件的发生概率，以及底事件的概率重要度、关键重要度，为风险控制提供定量化依据。在进行故障树的定量分析时，应满足几个条件：

- 底事件之间相互独立；
- 底事件和顶上事件都只有两种状态：发生或不发生（正常或故障）；
- 一般情况下，故障分布都假设为指数分布；
- 整个系统为单调关联系统。

（1）底事件及顶上事件的发生概率

底事件的发生概率包括系统的单元(部件或元件)故障概率及人的失误概率等，而在工程上计算时，往往用底事件发生的频率来代替其概率值。基于收集到的 DTBJ 热电厂一、二期建设中的 45 个案例，即“表 4 DTBJ 热电厂建设项目风险因素统计表”，将案例中出现的所有“安装调试风险”分解对应到相应的底事件层次上，并进行统计汇总，以此来计算底事件发生的概率。计算方法如下：

$$p_i = \frac{n_i}{\sum_{i=1}^{54} n_i}$$

式中， p_i 为第 i 个底事件的发生概率， n_i 为案例中第 i 个底事件发生时引起 DTBJ 热电厂建设工程安装调试风险也发生的次数。由于该故障树由 54 个底事件构成，所以 i 的取值从 1 至 54。上式即表示第 i 个底事件发生的次数占所有事件发生总次数的比例。表 9 给出了在 DTBJ 热电厂建设工程中，发生安装调试风险的底事件出现次数统计结果，以及根据上述公式计算出的各底事件的发生概率。

表 9 发生安装调试风险的底事件出现次数及底事件发生概率统计表

工程 编号	2	7	13	14	15	19	20	23	24	27	28	29	31	38	40	42	发生 次数	发生 概率
X1	0	2	1	3	0	0	0	0	0	0	0	2	1	0	0	3	12	0.0214
X2	0	1	1	2	0	0	2	0	0	0	0	3	0	0	2	2	13	0.0232
X3	0	3	1	2	0	0	2	0	0	0	0	2	1	0	1	4	16	0.0286
X4	0	2	2	3	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	1	1	11	0.0196
X5	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	4	0.0071
X6	1	0	0	0	2	1	1	1	2	0	0	0	0	0	0	0	8	0.0143
X7	0	0	0	0	2	0	1	1	4	0	3	0	0	0	0	0	11	0.0196
X8	2	0	0	0	1	1	1	0	3	0	0	0	0	0	0	0	8	0.0143
X9	1	0	0	0	2	2	2	1	2	0	0	0	0	0	0	0	10	0.0179
X10	0	0	0	0	1	1	1	0	3	0	2	0	0	0	0	0	8	0.0143
X11	0	3	4	2	0	0	1	0	0	0	1	1	0	0	2	1	15	0.0268
X12	0	1	2	1	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	2	1	9	0.0161
X13	0	2	3	1	0	0	2	0	0	2	2	1	0	0	1	2	16	0.0286
X14	0	3	1	2	0	0	1	0	0	3	0	0	0	0	2	1	13	0.0232
X15	0	1	3	0	0	0	0	0	0	2	0	1	0	0	0	1	8	0.0143
X16	0	2	2	2	0	0	2	0	0	4	0	1	0	0	2	0	15	0.0268
X17	0	2	3	0	0	0	1	0	0	2	0	0	0	0	1	1	10	0.0179
X18	0	3	2	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	1	1	9	0.0161
X19	0	0	1	0	1	2	1	2	0	2	2	0	0	0	0	0	11	0.0196
X20	0	0	2	0	2	1	2	3	0	2	1	0	0	0	0	0	13	0.0232
X21	0	0	2	0	1	1	1	2	0	1	0	0	0	0	0	0	8	0.0143
X22	0	0	1	0	3	0	1	1	0	2	0	0	0	0	0	0	8	0.0143
X23	4	0	3	0	2	1	4	1	0	0	0	0	2	0	0	0	17	0.0304
X24	3	0	2	0	2	1	3	2	0	0	0	0	3	0	0	0	16	0.0286
X25	0	0	1	0	1	2	2	2	0	0	0	0	0	0	0	0	8	0.0143
X26	0	0	3	0	3	1	2	2	0	2	0	0	0	0	0	0	13	0.0232
X27	0	0	1	0	2	3	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	9	0.0161
X28	0	0	2	0	3	0	2	1	0	3	0	0	0	0	0	0	11	0.0196
X29	0	0	2	0	2	1	1	3	0	2	0	0	0	0	0	0	11	0.0196
X30	0	0	3	0	0	1	0	2	0	2	1	0	0	2	0	0	11	0.0196
X31	3	0	1	0	1	1	3	4	0	0	0	0	0	3	0	0	16	0.0286
X32	4	0	1	0	2	2	0	2	0	2	0	0	0	2	0	0	15	0.0268
X33	0	0	2	0	1	1	1	2	0	2	0	0	0	2	0	0	11	0.0196
X34	0	0	1	0	3	1	3	1	0	0	0	0	0	4	0	0	13	0.0232
X35	0	0	2	0	2	2	0	2	0	1	0	0	0	2	0	0	11	0.0196
X36	0	0	1	0	1	1	2	2	0	2	0	0	0	3	0	0	12	0.0214
X37	0	0	3	0	3	0	0	2	0	2	2	0	0	2	0	0	14	0.0250
X38	0	0	1	0	1	2	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	7	0.0125
X39	0	0	2	0	0	1	1	1	0	2	0	0	0	0	0	0	7	0.0125

X40	0	0	2	0	1	1	2	0	0	3	0	0	0	0	0	0	9	0.0161
X41	0	0	1	0	2	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	6	0.0107
X42	2	0	1	0	2	2	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	10	0.0179
X43	0	0	2	0	1	1	2	2	0	0	0	0	0	0	0	0	8	0.0143
X44	4	0	0	0	2	2	1	1	0	0	0	0	2	0	0	0	12	0.0214
X45	3	0	0	0	1	2	0	1	0	0	0	0	4	0	0	0	11	0.0196
X46	0	0	0	0	1	1	2	1	0	2	0	0	2	0	0	0	9	0.0161
X47	0	0	0	0	1	1	1	2	0	1	1	0	3	0	0	0	10	0.0179
X48	2	0	0	0	3	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	8	0.0143
X49	3	0	0	0	1	1	2	2	0	1	0	0	0	0	0	0	10	0.0179
X50	2	0	0	0	1	2	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	7	0.0125
X51	2	0	0	0	2	2	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	8	0.0143
X52	3	0	0	0	1	0	1	2	0	0	0	0	0	0	0	0	7	0.0125
X53	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0.0018
X54	0	2	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	6	0.0107
合计																	560	1

从表中可以看出，在这 54 个底事件中，发生的概率最大的是 $p_{x23}=0.0304$ ，最小的是 $p_{x53}=0.0018$ ，即发生概率最大的底事件是“导线断股”，发生概率最小的底事件是“设计制造结构不合理”。由此可见，应该对“导线断股”这一底事件采取高度重视，应采取预防性措施，降低该底事件的发生概率。

顶上事件的发生概率采用“上行法”进行求解，在求解过程中，对于“与门”连接的事件，其发生概率按下式计算：

$$P(T) = \prod_{i=1}^n p_i$$

对于“或门”连接的事件，其发生概率按下式计算：

$$P(T) = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - p_i)$$

根据表 9 得到的底事件发生概率 p_i ，按照上述公式逐级向上计算，最终可得到顶事件 DTBJ 热电厂建设工程安装调试风险的发生概率为 $P(T)=0.5694$ 。由计算结果可见，就目前的情况看，DTBJ 热电厂建设工程安装调试风险发生的概率较大，对整个项目建设会造成较大的负面影响，必须采取各种有力的措施降低顶上事件发生的概率。

(2) 底事件的概率重要度分析

底事件的结构重要度分析只是按故障树的结构形式，分析各底事件发生对顶事件发生的影响程度。此外，还应考虑各底事件发生概率对顶事件发生概率的影响，即概率重要度分析。

底事件 i 的概率重要度 $I_g(i)$ 可按照下述公式计算：

$$I_g(i) = \frac{\partial P(T)}{\partial p_i}$$

根据前面所计算出的顶事件“DTBJ 热电厂建设工程安装调试风险”的发生概率 $P(T)$ ，以及表 9 给出的各底事件发生概率 p_i ，求解可得到各底事件的概率重要度 $I_g(i)$ ，结果见表 10。

表 10 底事件的概率重要度

底事件	概率重要度
X1	0.99683261
X2	0.99683261
X3	0.99683261
X4	0.99683261
X5	0.99683261
X6	0.99683261
X7	0.99683261
X8	0.99683261
X9	0.99683261
X10	0.99683261
X11	0.00020125
X12	0.00033500
X13	0.99683261
X14	0.99683261
X15	0.99683261
X16	0.99683261
X17	0.99683261
X18	0.99683261
X19	0.99683261
X20	0.99683261
X21	0.99683261
X22	0.99683261
X23	0.99683261
X24	0.99683261
X25	0.99683261
X26	0.99683261
X27	0.99683261
X28	0.99683261
X29	0.99683261
X30	0.99683261
X31	0.99683261
X32	0.99683261
X33	0.99683261
X34	0.99683261
X35	0.02142857
X36	0.01964285
X37	0.99683261
X38	0.99683261
X39	0.99683261
X40	0.99683261

X41	0.99683261
X42	0.99683261
X43	0.99683261
X44	0.99683261
X45	0.99683261
X46	0.99683261
X47	0.99683261
X48	0.02678571
X49	0.02678571
X50	0.02678571
X51	0.04464285
X52	0.04464285
X53	0.00043048
X54	0.00043048

由表可见，底事件的概率重要度 $I_g(i)$ 排序如下：X1=X2=X3=X4=X5=X6=X7=X8=X9=X10=X13=X14=X15=X16=X17=X18=X19=X20=X21=X22=X23=X24=X25=X26=X27=X28=X29=X30=X31=X32=X33=X34=X37=X38=X39=X40=X41=X42=X43=X44=X45=X46=X47>X51=X52>X48=X49=X50>X35>X36>X53=X54>X12>X11。由底事件的概率重要度大小排序可以看出，底事件 X1（四管磨损）、X2（四管疲劳）、X3（四管过热）、X4（四管腐蚀）、X5（四管质量缺陷）、X6（压力过低或过高）、X7（纯度过低）、X8（温度过低或过高）、X9（湿度过高）、X10（氢气爆炸）、X13（轴承轴瓦运行温度过高）、X14（串轴现象发生）、X15（发电机鼠笼转子断条）、X16（电气开关和保护引发风机跳闸）、X17（热工保护和其他连锁引发风机跳闸）、X18（进口导叶执行机故障引发风机负荷摆动）、X19（短路事故）、X20（局部放电）、X21（堵塞漏水）、X22（接头事故）、X23（导线断股）、X24（断水）、X25（局部固有频率振动）、X26（片间绝缘损坏）、X27（局部压装变松）、X28（压装变松）、X29（电阻温度计损坏）、X30（匝间短路）、X31（转子绕组漏水）、X32（转子绕组接地）、X33（过热变形）、X34（部分水路堵塞）、X37（烧毁）、X38（发生故障）、X39（过负荷）、X40（失磁）、X41（断裂）、X42（温度高）、X43（震动大）、X44（冷却机漏水）、X45（结露）、X46（导线磨损）、X47（导线腐蚀）的概率重要度最大且相等，说明这些事件发生概率的变化时对顶上事件发生概率的影响最大。因此，安装调试过程中应重点对这些事件加以控制，尽可能降低风险发生的可能性。其次，底事件 X51（密封环磨损）、X52（密封环漏油）的概率重要度也较大且相等，它们发生概率的变化，对顶上事件发生概率的影响也比较大，即对“密封环磨损”和密封环漏油“这两个底事件也要重点防范。相反，对于“与门”连接的底事件之间，底事件的发生概率越高，其概率重要度反而越低，如 X11（轴承发热）、X12（进出口导叶和叶轮磨损）和 M28（风机振动问题），X35（负序电流引起的损坏）和 X36（护环裂开），说明在改善系统可靠性方案的实施方面，应该将精力投入到发生概率最小的这几个底事件上。

（3）底事件的关键重要度分析

关键重要度表示某个底事件发生概率的变化率，所引起的顶事件发生概率的变化率，它能够从本质上反映各底事件在事故树中的重要程度。相比于底事件的概率重要度系数来说，关键重要度比概率重要度更具有实际意义。底事件 i 的关键重要度 $I_g^c(i)$ 的计算公式如下：

$$I_g^c(i) = \lim_{\Delta p_i \rightarrow 0} \frac{\Delta p(T)/p(T)}{\Delta p_i/p_i} = \frac{p_i}{p(T)} \cdot \lim_{\Delta p_i \rightarrow 0} \frac{\Delta p(T)}{\Delta p_i} = \frac{p_i}{p(T)} \cdot I_g(i)$$

根据表 10 得到的各底事件的概率重要度 $I_g(i)$ ，顶事件“DTBJ 热电厂安装调试风险”发生概率 $P(T)=0.5694$ ，以及表 9 得到的底事件发生概率 p_i ，计算得到底事件的关键重要度结果如表 11

所示。

表 11 底事件的关键重要度

底事件	关键重要度
X1	0.0374643757
X2	0.0406155848
X3	0.0500692123
X4	0.0343131665
X5	0.0124297695
X6	0.0250346062
X7	0.0343131665
X8	0.0250346062
X9	0.0313370245
X10	0.0250346062
X11	0.0000094723
X12	0.0000094723
X13	0.0500692123
X14	0.0406155848
X15	0.0250346062
X16	0.0469180032
X17	0.0313370245
X18	0.0281858153
X19	0.0343131665
X20	0.0406155848
X21	0.0250346062
X22	0.0250346062
X23	0.0532204215
X24	0.0500692123
X25	0.0250346062
X26	0.0406155848
X27	0.0281858153
X28	0.0343131665
X29	0.0343131665
X30	0.0343131665
X31	0.0500692123
X32	0.0469180032
X33	0.0343131665
X34	0.0406155848
X35	0.0007366351
X36	0.0007366351
X37	0.0437667940
X38	0.0218833970
X39	0.0218833970

X40	0.0281858153
X41	0.0187321878
X42	0.0313370245
X43	0.0250346062
X44	0.0374643757
X45	0.0343131665
X46	0.0281858153
X47	0.0313370245
X48	0.0006730594
X49	0.0008425009
X50	0.0005883386
X51	0.0011226027
X52	0.0009812961
X53	0.0000013640
X54	0.0000081082

由表 11 可得底事件的关键重要度的排序如下：X23>X3=X13=X24=X31>X16=X32>X37>X2=X14=X20=X26=X34>X1=X44>X4=X7=X19=X28=X29=X30=X33=X45>X9=X17=X42=X47>X18=X27=X40=X46>X6=X8=X10=X15=X21=X22=X25=X43>X38=X39>X41>X5>X51>X52>X49>X35=X36>X48>X50>X11=X12>X54>X53。通过底事件的关键重要度的排序可以看出，底事件 X23（导线断股）、X3（四管过热）、X13（轴承轴瓦运行温度过高）、X24（断水）、X31（转子绕组漏水）、X16（电气开关和保护引发风机跳闸）、X32（转子绕组接地）、X37（烧毁）等的关键重要度较大，说明这些底事件概率的变化，对顶上事件发生概率的影响很大。同时，也说明系统的改善效果对于这些底事件的改善比较敏感，即通过这些底事件改善系统比较容易实现。所以，降低这些底事件的发生概率会产生较好的效果，应该对这些底事件进行重点监控，采取措施来降低其发生的可能性。

在以“或门”连接的底事件中，底事件的概率越高，其关键重要度也越高。在该工程中，这些底事件包括 X23（导线断股）、X3（四管过热）、X13（轴承轴瓦运行温度过高）、X24（断水）、X31（转子绕组漏水）、X16（电气开关和保护引发风机跳闸）、X32（转子绕组接地）、X37（烧毁）、X2（四管疲劳）、X14（串轴现象发生）、X20（局部放电）、X26（片间绝缘损坏）、X34（部分水路堵塞）、X1（四管磨损）和 X44（冷却机漏水）。这些事实说明，在控制方案的实施上，应该将主要精力投入到这些最易发生的底事件上，以降低它的发生概率，改善系统的稳定性。另外，在应用关键重要度进行计算时，“与门”下的所有底事件的关键重要度是相同的，如 X11（轴承发热）和 X12（进出口导叶和叶轮磨损）、X35（负序电流引起的损坏）和 X36（护环裂开）关键重要度均相等，也就是说关键重要度对“与门”是无意义的，没有实际指导价值。

（4）底事件重要度的综合排序

在上述对 DTBJ 热电厂建设工程安装调试风险故障树的分析过程中，分别研究了底事件的结构重要度、概率重要度和关键重要度，这些指标从不同的角度反映出各底事件在风险控制中的重要程度。下面将对这三个重要度指标进行综合分析，以综合评价各底事件在故障树中的重要程度。在此，采用对底事件的三个重要度顺序数取平均值的方法，对其进行综合。对每一种重要度，每个底事件都有一个序数，如果底事件的重要度值唯一，那么它的顺序数就是它的序数；如果两个以上的底事件有相同的重要度值，那么这几个底事件序数的平均值就是它们的顺序数。把三种重要度的顺序数取平均值，即可对底事件进行排序，最终得到的

底事件的重要度排序结果见表 12。

表 12 底事件的重要度排序表

排列次序	底事件	平均值	排列次序	底事件	平均值
1	X23	38.3	28	X18	28.8
2	X3	37.5	29	X27	28.8
3	X13	37.5	30	X40	28.8
4	X24	37.5	31	X46	28.8
5	X31	37.5	32	X6	26.8
6	X16	36.5	33	X8	26.8
7	X32	36.5	34	X10	26.8
8	X37	36	35	X15	26.8
9	X2	35	36	X21	26.8
10	X14	35	37	X22	26.8
11	X20	35	38	X25	26.8
12	X26	35	39	X43	26.8
13	X34	35	40	X38	25.2
14	X1	33.8	41	X39	25.2
15	X44	33.8	42	X51	25
16	X4	32.2	43	X41	24.7
17	X7	32.2	44	X52	24.7
18	X19	32.2	45	X5	24.3
19	X28	32.2	46	X49	22.7
20	X29	32.2	47	X48	21.7
21	X30	32.2	48	X50	21.3
22	X33	32.2	49	X35	5
23	X45	32.2	50	X36	4.7
24	X9	30.2	51	X54	3.7
25	X17	30.2	52	X53	3.3
26	X42	30.2	53	X12	3
27	X47	30.2	54	X11	2.7

通过对底事件的重要度排序，可以发现，底事件 X23(导线断股)的重要度值最大，它对 DTBJ 热电厂建设工程安装调试风险发生的影响最大，在施工中应重点对这个环节认真做好防范控制。其次，X3(四管过热)、X13(轴承轴瓦运行温度过高)、X24(断水)、X31(转子绕组漏水)、X16(电气开关和保护引发风机跳闸)、X32(转子绕组接地)、X37(集电环-电刷烧毁)的重要度也比较大，也要采取必要的措施来降低其发生的概率。

(5) 基于综合排序结果的敏感性分析

敏感性分析来源于经济领域，用来研究项目中不确定因素的变化对经济效益产生的影响，是一种可行性分析的实用方法。敏感性分析目前已被应用于可靠性领域，用来研究各种因素对系统可靠性的影响。广义的敏感性分析指诸多的因素都会对项目决策产生影响，而这些因素常处于不确定状态，所以需要测定并分析这些因素的变化对目标的重要性。从定性的角度来看，敏感性分析是指其他变量保持不变，变量 X 改变一个相同的增量时，对因变量贡献大小的评价，也即是因变量影响程度的比较。

在该项目中，变量 X 为底事件的发生概率，因变量为顶事件的发生概率 P(T)。根据表 9 的结果，分别选取排序靠前、中间和靠后的几个底事件 X23、X1、X47、X38、X11 作为变量 X，在保持其他变量不变的情况下，设定每个变量 X 发生概率变化范围为 0~0.05，求取其变化时顶事件发生概率 P(T)的变化情况，观察其敏感性高低，验证综合排序结果的正确性。计算的结果如表 13 所示。

表 13 底事件 P(T)值敏感性数值表

X 值	0	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05
X23	0.5559096	0.5603505	0.5647914	0.5692323	0.5736732	0.5781141
X1	0.5599615	0.5643619	0.5687622	0.5731626	0.5775630	0.5819634
X47	0.5615616	0.5659460	0.5703304	0.5747148	0.5790992	0.5834835
X38	0.5639401	0.5683007	0.5726613	0.5770219	0.5813825	0.5857431
X11	0.5693886	0.5693894	0.5693903	0.5693912	0.5693920	0.5693929

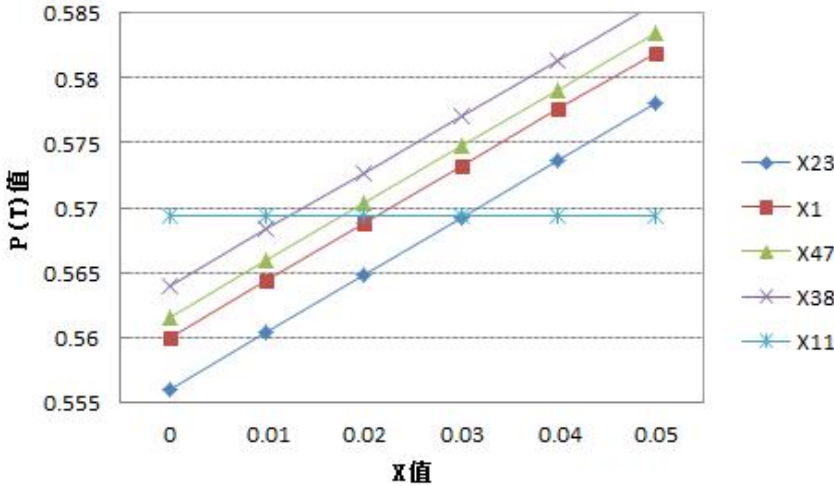


图 6 底事件敏感性曲线图

根据该表中的数据，可以绘制出相应的敏感性变化曲线，由此可以更为直观地描述底事件发生概率的变化对顶事件发生概率的影响程度。底事件的敏感性曲线见图 6，由图可以看出，在底事件的重要度综合排序中，排名越靠前的底事件，其敏感性曲线斜率越大；排名越靠后的底事件，其敏感性曲线斜率越小。说明重要度值越大的底事件敏感性越高，其对顶事件的影响程度越大；重要度值越小的底事件敏感性越低，其对顶事件的影响程度越小。由此可见，底事件敏感性分析结果与底事件重要度综合排序结果一致，底事件重要度综合排序结果是正确可信的。

4 风险控制措施及实施效果

4.1 风险控制和应对措施

（1）底事件 X23 的控制措施制定

底事件 X23 是“导线断股”。在电场作用下的发电机定子绕组在运行时，与下层线棒相比，

同槽同相的上层线棒，所受电磁力是其三倍，槽部电磁场强度最大。线棒以发电机频率两倍的速率进行切向和径向振动。对于这个项目，发电机的定子绕组通常使用 360°换位。端部绕组仍然有额外的横向和径向漏磁场，它创建了一个额外的电势，其在导线内产生环流而引起额外的损耗和温度上升，特别是同槽同相上层线棒的端部，承受的温度最高。焊接、制造等缺陷出现时，运行中的发电机会在一些因素的影响下，如电磁力、机械振动、温度升高和其他因素，以及端部接头和云母盒焊接搭接焊缝不好、填充不实、漏焊等，就会出现导线断股的情况。针对上述情况，制订措施如下：

1) 测量定子绕组的直流电阻

测量汽轮发电机定子绕组的直流电阻，是监督与检查定子绕组线棒是否存在断股、接头质量好坏的最为常用的有效措施之一。在测量试验中，导线断股表现为直阻变大。影响定子绕组直流电阻的因素，主要有以下几点：

- 定子绕组端部接头的结构；
- 线棒并联导线的股数；
- 组成一相绕组的线棒数量；
- 一相内接头开焊，或并联导线断股的线棒数量。

根据定子绕组运行的实际情况，以及试验规程的要求，对发电机定子绕组的各相，或各分支的直流电阻值分别进行测量，比较其相间互差，并与初次测量值加以比较，相差应不大于最小值的 1.5%。

2) 焊接有断股的导线

对于有断股的导线，焊接后应该测量直流电阻，相间差若符合规定标准，方为合格。本项目的汽轮发电机，定子绕组端部接头的结构有下面几种，应采用搭接银焊的方法，需要注意的是应使用相同规格的铜线：

- 在线棒末端，并联导线对接后，加装一个并头套，然后注入焊锡；
- 线棒末端的并联导线，每股分别对接铜焊后，各股导线之间均包有绝缘，无外套；
- 线棒末端的并联导线，每股分别对接铜焊后，各股导线之间均不包绝缘，无外套。

3) 重新制作云母盒

外层线圈之间留有间隙，股线之间没有填充料，是由于云母盒填料不实，导致导线固定不好，从振动角度讲，阻尼小、振幅大，导致导线容易磨断；而内层导线之间压得比较结实，固定比较好，接触比较紧密、振幅小，所以导线不易磨断。对于这种情况，应采用人造云母片，盒内填充填料应采用二倍的“6101 环氧树脂”与一倍的“651 固化剂”，混合后再与烘干的 200 目石英粉混合成“环氧泥”，来重新制做云母盒。

(2) 底事件 X3 的控制措施制定

底事件 X3 是“四管过热”。锅炉“四管”是指锅炉水冷壁、省煤器、过热器和再热器，它们包含了锅炉的所有受热面，“四管”外部承受着侵蚀、高温和磨损，内部充满各种高压化学成分的混合物，是集中传递能量的关键部位。“四管过热”是指四管在运行过程中受热面的温度超过金属的允许温度，此时，在内压力的作用下，产生的应力就有可能超过金属的允许应力。因此，在过热且高压的条件作用下，金属管道就会产生蠕变、塑性变形，最终导致“四管爆漏”。

造成“四管过热”的主要原因如下：在设计时，由于失误而使受热面布局不合理，导致出现冷却不足或流量偏差，从而导致管子过热；在锅炉运行时，燃烧控制不当，导致局部负荷过高，就会出现过负荷和超温现象，从而导致管子过热；在安装、检修、制造过程中没有将管内残余的焊渣、铁屑等残留物清理干净，或者焊接处有焊瘤，阻碍管内工质流动，造成管子过热；上游管道破损，导致冷却工质无法到达下游管道，会造成下游管道过热；管道内部出现氧化垢和其他沉淀物，传热效果大大降低，导致管子过热。

为了避免“四管过热”对热电厂设备运行带来危害，制定预防措施如下：

1) 水冷壁防过热措施

水冷壁防过热的具体措施包括：

- 强化焊缝质量管理。做好制造质量方面的检验同时，电厂自身要强化安装工作。此外，还要做好焊口检验以及焊缝质量检验。
- 确保水冷壁膨胀均匀自由。检修方面，应采取一定的措施，比如，在水冷壁下端留出一定空间，并防止异物进入，避免由于膨胀不畅导致的应力损坏；运行方面，做好启炉期间的上水温度、速度和升温升压速度的控制。
- 防止高温腐蚀。第一，提高金属抗腐蚀能力；第二，减低受热面壁的温度，加强水冷壁吹灰；第三，防止局部负荷过高，确保前后墙对冲燃烧；第四，保持适当含氧量，避免高温缺氧现象的发生，合理送风；第五，改进燃烧工况，防止火焰冲刷偏斜。

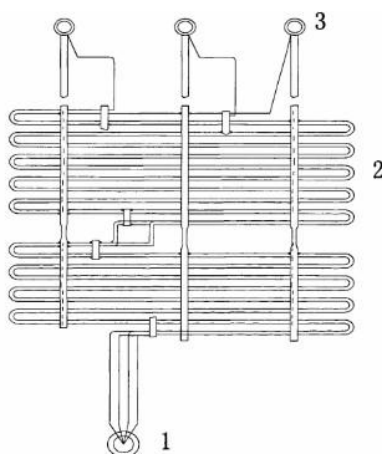
2) 过热器和再热器防过热措施

过热器和再热器防过热的具体措施包括：

- 防止过热。第一，确保适当的流速，启动过程中尽量排空受热管中的水份，控制水压升高的速度，检修时避免杂物落入管内，防止发生水塞；第二，防止结焦，及时清理受热面结渣和积灰；第三，严密监督管壁温度，及时调整燃烧工况；第四，从设计的角度出发，保证管材裕量充足；第五，减少热偏差，防止局部热负荷过高。
- 加强受热面检查工作。由专人定期对过热器进行蠕胀测量，为了利于测试值的比较，测试时每次都要在同一位置进行，发现异常时应与日常测量值进行比较，必要时应更换过热管。
- 正确使用减温水。正确使用减温水，表头显示减温水的流量最大为 30 吨 / 小时，并保证一、二级减温器后的汽温不超过计算值。
- 运行人员应精心操作。运行人员应在操作时要防止燃烧中心不合适、热负荷过分集中等问题。

3) 省煤器防过热措施

省煤器结构如图 7 所示。对于省煤器，防止过热的具体措施如下：



1—进口集箱 2—省煤器管组 3—出口集箱

图 7 省煤器结构

- 安装时应将防磨衬套加装在易磨损部位。

- 避免给水量的猛增猛减，保持给水温度和流量的稳定。
- 注意观察省煤器两侧烟温，出现偏差时应及时查明原因并消除。如果是由于省煤器管爆漏而引起的烟温偏差，应尽快做停炉处理。
- 避免超负荷运行而导致的省煤器过热，使锅炉保持在额定负荷下运行。

(3) 底事件 X13 的控制措施制定

底事件 X13 是“轴承轴瓦运行温度过高”。本工程的引风机配用电机采用 4 台 630kW 直流电机，电机两端轴承结构为滑动轴承，轴瓦宽为 210mm，轴颈Φ170mm，冷却方式为自然冷却。颈与轴瓦在滑动轴承的工作过程中会因接触产生摩擦，如果出现供油方式有误、润滑不良、轴间隙不足、轴瓦和轴承位置不对等问题，便会导致表面发热、磨损甚至“咬死”，继而持续升温、轴承轴瓦烧损，对锅炉的正常使用造成危害。

对于“轴承轴瓦运行温度过高”，可以采取的控制措施如下：首先调整滑动轴承的接触角；其次是严把轴瓦在刮研过程中的质量关，控制制造质量，确保达到要求的精度；第三是改进轴瓦的润滑结构，这样的方式可以有效降低滑动轴承在运行时的温度，提高使用寿命。

1) 调整接触角

接触角是指轴颈与滑动轴承的接触面所对的圆心角，它不可以太大也不可以太小，太大会影响油膜的形成，从而没有好的液体润滑；太小会使滑动轴承的压强增大，更甚至于会使滑动轴承产生较大的变形，使磨损加速，缩短使用寿命。所以，在不对滑动轴承受压条件产生影响的前提下，接触角越小越好。从摩擦力矩的理论的角度来分析，当接触角为 60°时，摩擦力矩最小。本工程所使用 630kW 直流电机工作转速为 800 r / min，接触角为 60°。

2) 确保轴瓦质量

可以用单位面积上的实际接触点数，来表示轴颈与滑动轴承表面的实际接触情况，实际接触点越细、越多、越均匀，则代表滑动轴承刮研得越好；如果相反，则代表滑动轴承刮研得越不好。生产运行中，应该根据滑动轴承的性能和工作条件来确定接触点，一般情况下，接触点越细、越多，刮研难度越大。根据表 14，该项目所用为 630kW 直流电机，工作转速为 800 r / min，所选接触点为 15 ~20。

表 14 轴颈与滑动轴承表面的实际接触点数情况

滑动轴承转速(r / min)	接触点(每 25 mm×25 mm 面积上的接触点数)
100 以下	3~5
100~500	10 ~15
500~1000	15 ~20
1000 ~2000	20 ~25
2000 以上	25 以上

3) 改进润滑结构

本工程原来使用的 630kW 电机轴瓦，采用的润滑方式是通过甩油环进行润滑，即下供油方式。该方式易造成润滑油供油不足，无法形成足够厚度的油膜，可能导致电机的轴瓦烧毁，不适合该工程的实际生产运行。后改进了 4 台主电机 8 个轴承轴瓦的润滑方式，改为上供油方式。甩油环依然保留，电机两端的润滑采用并联方式，通过改进润滑管路，将润滑油通过观察孔直接喷在轴上。改进后的润滑油供油方式供油充足，有足够的油量形成油膜，保证了摩擦面时刻处于液体摩擦的状态，可以及时带走轴承运行时产生的热量。当发生诸如故障或断电等意外状况时，可以保障甩油环依然持续向轴瓦供油。改进前、后轴瓦结构图，分别见图 8 和图 9。

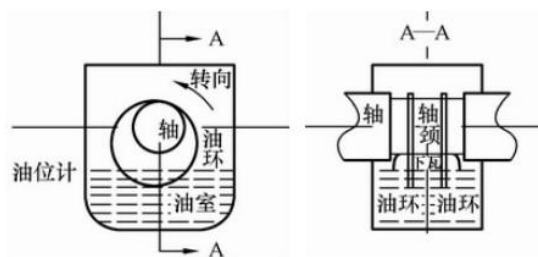


图 8 改进前的轴瓦结构

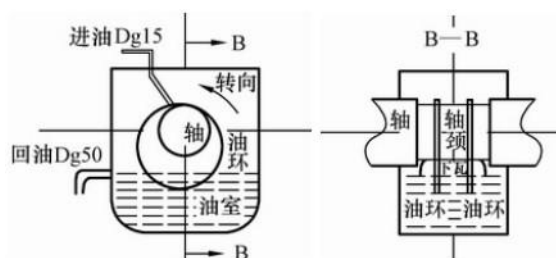


图 9 改进后的轴瓦结构

(4) 底事件 X24 的控制措施制定

底事件 X24 是“断水”。汽轮发电机的定子绕组一般都采用水内冷技术，保证机组安全稳定运行的重要条件就是冷却水路畅通，保证有足够的冷却水流量。机组正常运行时，线棒内部的冷却水使其维持在一个合理的温度范围内。但是，如果出现由于各种情况造成的断水，诸如由于冷却水路堵塞等，那么铜损所产生的热量就无法被带走，以至于造成线棒温度的急剧上升。这种情况下，如果不采取必要的措施，温度持续保持在较高水平上，则会严重缩短线棒的绝缘使用寿命，更甚则会烧毁发电机。此外，冷却水中断运行时，在电场的作用下，电机线棒内纯水的温度会迅速升高，导致电导率急剧上升，冷却水水质变坏，时间过长时，发电机就会发生水支路堵塞或漏水现象，从而引起事故。

针对以上情况，可在运行管理方面和设计制造方面出发，制定防范控制措施。首先，在设备运行过程中，有的运行人员在巡查设备的过程中，对发电机出口水温非正常升高没有警觉；有的运行人员对系统不了解不熟悉，在设备已有标识的情况下依然误操作；有的运行人员不能熟练使用自动温度巡测仪，对其功能和使用方法不熟悉，应投的没有投，对明显的流量不足或断水的事故前兆未引起重视，不向上级报告，也不查找原因。因此，在运行管理方面，应该采取有力措施，加强教育和培训，从各方面提高运行人员的技术水平，提升责任感，以防范此类事故的发生。

其次，设计制造方面，采取的措施如下：

- 按照原来的设计，流量孔板被安装在外循环水管前面，如果外循环阀门开启，或是未完全关死，那么即使定子严重缺水或断水，断水保护也不会正确动作。后将外循环水管改接在定子进水母管定量孔板之前，通过对其运行中的观察，确认可以有效防止此类事故的发生。
- 将定子进、出水管由原来的汇水管中部接口改在汇水管顶部引出。这是一种将出水管下端插入水箱水平面以下，再用另一根导气管将定子进、出水汇水管顶部连通，并与水箱上部空间连通的一种水系统结构。这种结构的优点是可以在断水后，使定

子线圈和引水管内的水立即与进、出水管的水分离，这样就避免了在虹吸作用下将汇水管、定子线圈和绝缘引水管中的积水抽出，使绝缘引水管的耐电安全系数得以提高。

- 加大极相大接头的截面积，使其与定子线棒的电流密度相等。由于发电机励侧端部线圈极相组接头截面的电流密度大于定子线棒的电流密度，也大于水冷机组最大设计电流密度，一旦出现断水或流量不足的情况，大接头处发热最为严重，所以，应当采取加大极相大接头的截面积的措施。

(5) 底事件 X31 的控制措施制定

底事件 X31 是“转子绕组漏水”。本工程发电机转子绕组的冷却水流过设置在汽机房零米层的冷却水泵，经升压后流入发电机转子励端端部的进水管，再经聚四氟乙烯绝缘引水管，流入绕组线棒的空心导线，以带走转子线圈所产生的热量，转子线圈的汽端从转子上的整圈轴向出水孔甩至发电机出水支座，在离心力作用下，出水支座收集排水后，流回布设置在汽机房零米层的冷却水箱，这种方式称为水内冷方式。

转子冷却水管道和阀门等部件均使用不锈钢材料。发电机冷风室内安装漏水监测仪，用于监测发电机转子绕组漏水事故。转子绕组不仅要承受水压，还要承受高速度带来的离心力作用。转子绕组漏水在生产运行中是发生频率最高的故障，也是机组最严重的事故之一。该事故轻则导致停机停炉，重则导致主机损坏、绕组烧毁、大轴损坏。如果在安装和检修过程中预先发现引发漏水的隐患，就能防范事故的发生，通常采取的措施如下所述。

首先，在安装机组之前，要对转子绕组进行水压试验，试验压力为 8.0MPa，持续时间必须大于 9 小时，期间应仔细检查有无漏水点，并确保 9 小时内没有掉压现象。在机组生产运行过程中，要严密监控发电机漏水监测系统，确保系统正常运行。但是该监测系统只能判断有无漏水情况出现，却常常无法确定具体漏水位置，因此在接到漏水报警后，应立即前往查看发电机运行情况。此外，发电机转子绕组内部漏水时，转子水路改变，破坏了转子的质量平衡，导致转子振动发生突变，这也是判断转子绕组是否漏水的一个重要参考依据。

其次，现有的发电机转子出水支座，多利用铜制迷宫式梳齿密封环和环氧树脂板制成的密封环紧贴转子形成密封，如图 10 所示，虽然采用了双层密封环以提高其耐磨性，但是因为其厚度小，一般都在半年或一年后全部磨损，而必须进行停机检修更换，因此，应将其安装成浮动水挡式。水挡采用金属石墨等材质，耐磨性较高，所以，其与转子之间的径向间隙可以做得很小，就可以从根本上避免此处的漏水事故发生。此外，水挡间隙是由弹簧控制的，非常近似于非接触式密封，这样会使磨损变得很轻微，从而可以较长时间使用。

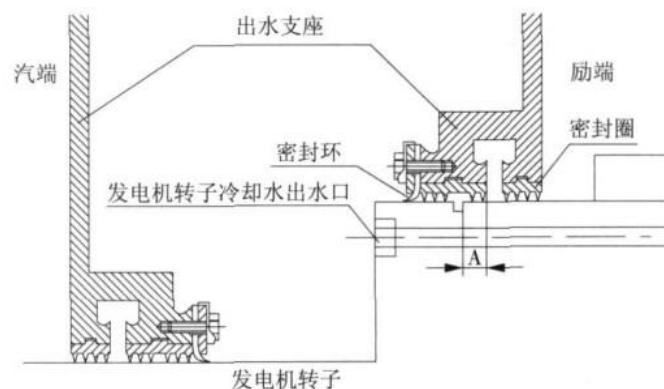


图 10 转子出水支座密封结构示意图

此外，一般在设计上都将发电机转子进水管与转子的连接设计成刚性连接，这样就会使管道上产生的振动直接传递到转子上，增加发电机转子的振动，导致发电机转子绕组进水密封处长时间处于高频振动，其间隙产生变化，发生泄漏。因此，应改为将进水管段设计成柔性联结，比如，采用金属软管来替代不锈钢管，使管道振动的传递被切断，从而杜绝因振动传递而造成的发电机转子绕组漏水事故。

（6）底事件 X16 的控制措施制定

底事件 X16 是“电气开关和保护引发风机跳闸”。引风机是火电厂重要的辅助设备之一，其作用是将锅炉在燃烧时产生的高温烟气排出，保持炉膛压力，形成流动烟气，以及完成烟气和空气之间的热交换，以此调整锅炉炉膛负压稳定。引风机结构如图 11 所示。

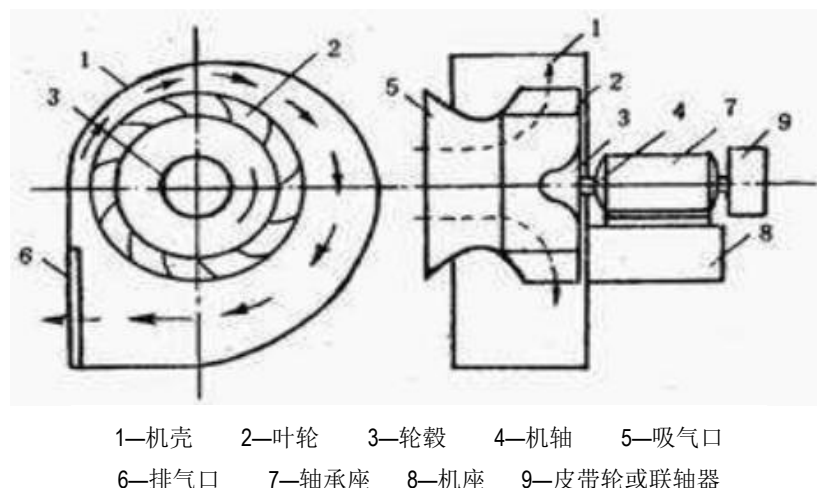


图 11 引风机结构图

引发风机跳闸的原因有吸风机热工保护动作、电源故障或误碰事故按钮、电动机故障引发电气保护动作等。针对这些事故的原因，制定的控制措施如下：

- 做好投油稳燃工作，严防锅炉灭火。
- 改为手动调整汽压和炉膛负压。
- 不允许抢合引风机跳闸，应手动检查跳闸侧引风机以下设备联跳。
- 将磨煤机给煤率减负荷 150MW，切换轴封及辅汽汽源，以防止磨煤机满煤或全部跳闸。
- 增加运行侧引、送、一次风机负荷，确保炉膛氧量、负压、一次风压正常。
- 将跳闸磨煤机一次风速断挡板关闭，同时将跳闸侧空预器出口侧一次风挡板关闭，以维持较高的一次风压。
- 确认跳闸侧吸风机出入口挡板和空预器入口烟气挡板是否已关联，并开启送风机出口二次风联络挡板。
- 做好引风机启动前的各项安全检查工作。

（7）底事件 X32 的控制措施制定

底事件 X32 是“转子绕组接地”。转子绕组接地是严重影响发电机组安全运行的故障隐患，是发电机最常见的故障之一。其特点是，当励磁回路发生一点接地故障时，对发电机暂时不会造成较大危害，可是一旦再发生第二点接地故障，就会使发电机转子无功出力降低，电流突然增大，以致产生剧烈振动，严重时威胁发电机组的安全运行。“转子绕组接地”的具体控制措施如下：

- 防止油污和金属异物进入。在安装护环前，要检查对端部线圈并进行清扫；在运输安装转子前，要将中心环进风口密封。
- 避免遗留物。在进行检修作业时，要对可能残存的异物或工艺隐患进行仔细检查。
- 防止发电机进油。要保持油压和氢压在额定的范围内，要按规定调整密封瓦以及油间隙。
- 严格控制氢气湿度、进风温度和水温。进风温度保持在 30~40℃，氢气相对湿度要低于 15%，内冷水温度要高于 40℃。
- 转子的设计、结构、工艺、检验质量都应提高。
- 安装先进的在线监测设备，如发电机转子运行状态在线监测设备。

若已经发生接地故障，首先要分清是稳定接地还是动态接地。如果是轴内引线接地，可以拔出引线，检查绝缘损坏情况，如果不严重则包扎绝缘即可；如果绝缘损坏严重，就削去引线绝缘，将其擦净后再包绝缘，可不换新线。如果是极掌磨破磁极引出线，则采用图 12 所示的方法处理：将胶木块做成凹槽形，并放在磁极连线背后，两头紧插在两极掌内侧。若转子绕组接地故障已出现，要依据现场的作业条件，停机后进行细致的检查处理，绝对不能退出保护运行，以免事故进一步恶化。此外，还要提高转子的工艺质量，避免接地隐患。

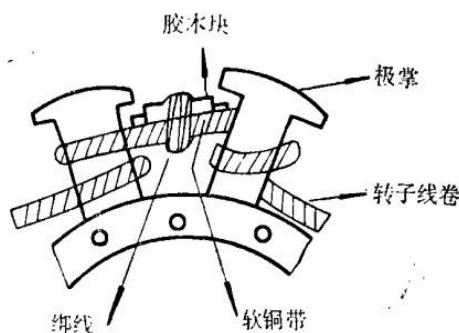


图 12 磁极引出线被极掌磨破的处理方法示意图

（8）底事件 X37 的控制措施制定

底事件 X37 是“集电环-电刷烧毁”。集电环-电刷装置中的集电环和电刷组成滑动的接触导体，向转子绕组提供励磁电流，在励磁系统中担负着繁重的任务。集电环-电刷的结构如图 13 所示，电刷排列较为紧密，由于发电机电刷采用负压冷却，而发电机运行过程中电刷磨损产生的碳粉、外部灰尘等，易进入电刷与刷握之间，致使部分电刷载流量突然增大而造成集电环-电刷烧毁事故。除此以外，导致集电环-电刷烧毁事发生的原因一般还有以下几种：电刷接触面电阻变化、气垫作用影响、电刷接触面电阻值大小不一致、电刷截面不足、弹簧压力大小不合适、电刷数量不足等。由此可见，减少发电机非正常停运的重要措施之一，就是确保集电环-电刷装置的正常运行。

为了防止集电环-电刷装置烧损事故的发生，一方面，应提高设备的质量，如改善其结构或采用性能好的电刷和刷握，强化运行监视手段等；另一方面，应加强设备的运行维护管理，做好测试、检查专用的仪器仪表校验工作，解决在线监测问题。具体措施如下：

- 应保证集电环-电刷之间滑动接触平稳，保持静止的电刷与高速旋转的集电环接触的稳定性。轴系振动和集电环径向跳动不能超过允许值。应定期吹扫集电环上的碳粉和背面的灰尘，保证其表面清洁无垢。
- 保证电刷与滑环的接触角为 90°~93°之间，保证其在发电机转子旋转方向上略向后倾。因为若前倾，电刷就会由于碰踢产生振动，在电刷不稳定的情况下会增大摩擦，

从而造成电流分配不均匀、滑环温度高等问题。

- 保证并联运行的电刷上通过的电流均匀分布。若分布不均，会导致电刷温度过高，易造成电刷打火。在此方面，应做到定期检查电刷电流，保持电刷卡簧压力正常，确保电刷上通过的电流分布均匀。
- 应保证电刷与刷握的间隙均匀，其值保持在 0.1~0.2mm 之间，这样可以避免因间隙过小而发生的卡涩现象。电刷要定期更换，并严格执行新电刷检测制度，淘汰不合格的电刷。
- 在发电机组检修时，应拆除电刷架，并清理集电环-转轴-风扇之间的区域。若条件允许，在机组停机备用期间应对该区域进行认真彻底的清理。
- 改善励磁整流系统的性能，降低励磁电流的交流分量，以保证集电环-电刷对地绝缘。此外，还应确保发电机转子一点接地保护可靠，在发生一点接地时能及时报警。
- 在集电环-电刷装置位置安装在线测温装置，同时运行人员加强巡视，当温度高于 120℃ 时发出警报，维护人员接到警报后应检查温度升高原因并及时处理。

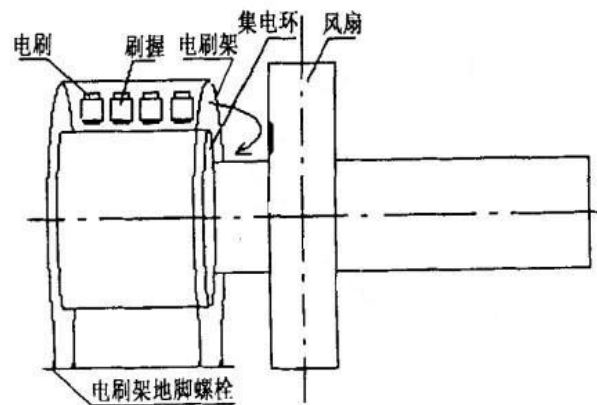


图 13 集电环-电刷结构图

(9) 其他风险控制措施

1) 技术风险

技术风险包括安装调试技术风险和土建施工技术风险。对于这类风险主要的控制措施如下：

- 认真做好工地的各项布置。施工方进入工地前应踏勘施工现场，搞清现场地下管道、高压线及通讯电缆等构筑物的位置结构；工地现场应具备“三通一平”的施工条件，应有污水池、排污坑等设施；电气线路的绝缘状况应符合要求，供电线路应架空或挖沟埋设；要提供足够的照明以保证夜间生产。
- 加强施工设备的安全与防护。平台板铺设要牢固、防滑；基台木轨道铺设长度要合适、稳固；配电箱应安装漏电保护器，箱柜应安装防雨措施，电器设备外壳应装设保护接地；栏杆、塔梯和工作台的安装应牢固可靠；电气开关要完好无损，熔断器、保险丝等按规定使用，不能超过额定标准，不能以铜丝或铁丝代替；起重用钢丝绳及绳卡要做到安全可靠；工地内的危险点应配备安全防护设施；重点部位要配备足够的防火设施。
- 严格施工规范操作。高空作业时，工具物品应放入工具袋，防止物品落下；机器运转时，不得进行擦洗，不得进行部件拆卸和修理作业；不准用手拉、抚摸或脚蹬运行中的钢丝绳；塔上和塔下不得同时作业，不得抛掷工具和物品；翻斗车只

允许在工地内使用，不得在公路上行驶；在焊接钢筋笼时，要严格执行安全操作规程。

2) 安全风险

安全主要指人身伤害风险和设备损坏风险，主要从以下两方面进行控制。对于正在运行的设备，不得进行拆卸和清扫，防止触电、烫伤、机械伤害、起重伤害等人身伤害；在安全罩、靠背轮、管道、栏杆、输煤皮带上或运行中的轴承上等危险部位，禁止人员站立或行走；在皮带运行中，不准用任何工具清理滚筒粘煤和清理落煤；必须执行起重机械“十不吊”；进行人工打焦、吹灰时要穿戴好劳动保护用具；起重作业时应正确使用各种起吊工用具，严禁超规范使用起吊设备，起吊时只允许一个工作负责人进行指挥工作，起吊时各工种配合步调要一致；各管道疏水出口应装设保护遮盖装置，防止放水时烫伤人；电气设备的金属外壳应装设良好的接地装置，临时使用的手动电气工具或检验电源均应加装漏电保护设施。

要防止在安装和调试过程中出现设备损坏。对于汽轮发电机组，要确保基础设备安装的合格；安装时气缸内部不能有活动部件留下；要做好汽轮机轴承中心标高，轴系连接要平直、同心；滑销系统间隙调整要在设计范围内。对于锅炉，要留有足够的设备吊装孔、管道预留孔、支吊架和基础预埋件等；放置锅炉时要按规定的标准，露出底座要确保锅筒与集箱的位置偏差在三毫米以内；要认真填充底部缝隙，以避免锅炉底部出现漏风问题；要仔细清理受热面管内的杂物。

3) 工期风险

工期风险主要指工期安排风险和施工因素风险，制定的控制措施如下：

- 要均衡配置各生产要素；
- 做好冬雨季施工的保障措施；
- 每一道工序的衔接应合理；
- 避免颠倒工序，要事先确定好施工顺序；
- 尽量减少交叉施工，合理安排各专业施工时间；
- 要制定周密、优选的施工方案，尤其是重点、难点工程环节。

4) 环境风险

环境风险包括政策环境风险和自然环境风险，应从以下几方面加以控制：

- 认真观察、分析和研究工程建设中将要面临的政策风险，提高对政策风险客观性的预见性认识，掌握规避政策风险的主动权。
- 事先预测本项目相应政策的风险度，并充分估计可能出现的损失，认真分析、及时发现潜在的政策风险并尽力避免。
- 在风险预测的基础上，合理安排工程施工计划，提出最佳方案，正确作出应对政策风险的决策，采取相应预防措施，将风险影响降至最低。
- 若本项目的确会给周边环境带来负面影响，应提前妥善处理，避免激化矛盾。
- 地质、水文、气候等方面因素的影响大多事先可以预测，可以事先采取措施，避免对工程实施产生不利影响。要贯彻预防为主方针，并狠抓落实。
- 应充分考虑自然环境因素，对于某些对气候比较敏感的施工环节，确保在具备作业条件的前提下进行施工。

5) 协调风险

协调风险包括指现场组织风险和材料供应风险，其应对措施如下：

- 定期召开各专业碰头会，各自提出合理意见和建议，对于工程建设中需要协调解决的问题，共同商讨拟定最佳解决方案。
- 工程开展过程中如果出现任何变更，均应及时通知各专业的设计、施工和监理人员，以便及时调整，避免工期延误。

- 提前进行专业分析，给各专业留有必要的施工时间，以保证工程质量。
- 做好技术交底，明确各专业的施工配合顺序，确保施工进度。
- 明确不同类别原材料的采购周期，并建立多级供应商体系，要求供应商保障原材料供应。
- 和供应商及时沟通，若材料采购存在困难，应及时讨论替代方案。
- 将不合格设备情况在第一时间传递给供应商，在最短时间拿出整改方案及供货计划，必要时另选择有一定技术实力的合格供应商供货。

4.2 风险控制措施的实施效果

在工程施工期间，上述风险控制措施被付诸到工程的实施中，有效地防止了风险事故的发生。在 DTBJ 热电厂建设工程完工后，对这些风险应对措施的实施效果进行了评价。由于提前针对风险因素制定了相应的措施，对于导致底事件发生的因素给予了及时的纠正和消除，所以并未出现较大的风险事故。DTBJ 热电厂建设项目底事件发生次数统计结果见表 15，本项目底事件发生总次数与历史上已经实施的 45 个案例的比较见表 16。

表 15 DTBJ 热电厂建设工程底事件出现次数统计表

底事件	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9	X10	X11	X12	X13	X14
发生次数	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
底事件	X15	X16	X17	X18	X19	X20	X21	X22	X23	X24	X25	X26	X27	X28
发生次数	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
底事件	X29	X30	X31	X32	X33	X34	X35	X36	X37	X38	X39	X40	X41	X42
发生次数	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
底事件	X43	X44	X45	X46	X47	X48	X49	X50	X51	X52	X53	X54		
发生次数	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0		

表 16 DTBJ 热电厂建设项目底事件出现总次数对比表

工程编号	发生次数	工程编号	发生次数
2	39	27	51
7	28	28	15
13	71	29	15
14	19	31	18
15	63	38	20
19	47	40	17
20	67	42	19
23	57	本工程	4
24	14		

从表 15 中的数据可以看出，DTBJ 热电厂建设工程在实施过程中，发生的风险事件仅有 4 次，分别是底事件 X4（四管腐蚀）、X28（压装变松）、X30（匝间短路）和 X45（结露）。从表 16 还可以看出，历史上已经实施的工程风险事件共发生 560 次，其中最多的发生 71 次，

最少的发生 14 次，平均发生 35 次，风险事件发生次数主要集中在 15~30 次之间。而在本工程施工阶段，由于针对底事件提前制定了针对性控制措施，并在实际中进行了切实的落实，底事件由以往工程项目平均水平的 35 次，下降到本工程的 4 次，下降了 88.6%。由此可见，本工程所制定的风险应对措施，对于降低风险事故发生的效果是非常明显。

此外，对于工程的其它风险，如土建施工技术风险、安全风险、工期风险、环境风险、协调风险等，由于也制定了相应的风险控制措施。所以，在该工程的建设过程中，并未发生重大的工程施工问题，也没有发生人员伤亡等事故。可见，对工程项目开展风险管理，非常有效地预防和消减了风险事故，取得了良好的实际效果。

问题讨论：

1. 该工程的风险是如何分类的？案例统计分析对于风险识别有何作用？
2. 工程安装调试风险故障树的内在本质是什么？故障树的定性分析有何实际意义？
3. 故障树的定量分析包括那些内容？这些内容之间有何关系？分析结果说明了什么？
4. 该工程的风险控制措施有哪些？其实施的效果如何？