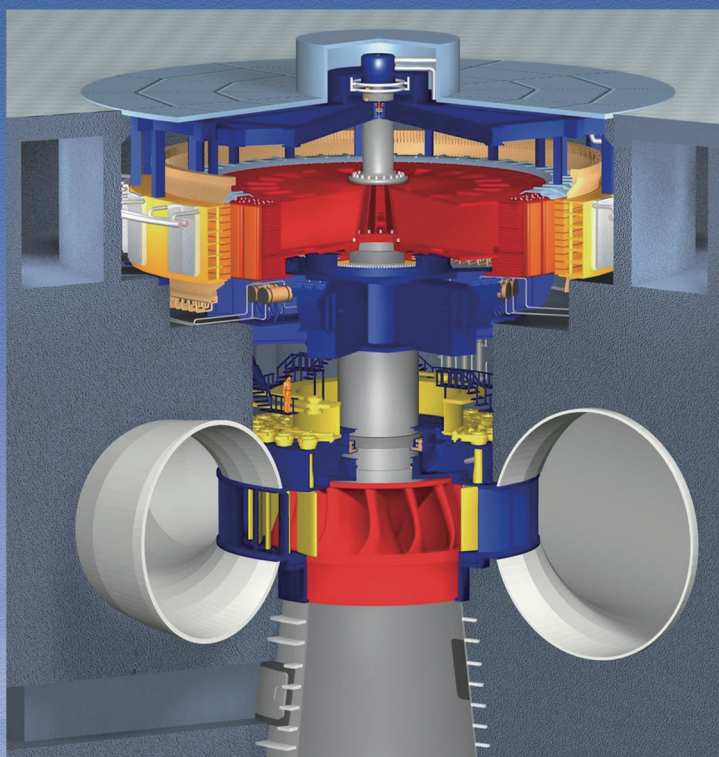


巨型混流式水轮发电机组 机械维护技术研究

李志祥 胡德昌 刘连伟 编著



中国三峡出版传媒
中国三峡出版社

中国长江三峡集团公司科技图书出版基金资助

巨型混流式水轮发电机组机械维护技术研究

李志祥 胡德昌 刘连伟 编著

(节选版)

中国三峡出版传媒
中国三峡出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

巨型混流式水轮发电机组机械维护技术研究 / 李志祥, 胡德昌, 刘连伟编著. -- 北京: 中国三峡出版社, 2018. 1

ISBN 978 - 7 - 5206 - 0010 - 1

I. ①巨… II. ①李… ②胡… ③刘… III. ①混流式水轮机-发电机组-机械维修-研究 IV. ①TM312. 07

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 262754 号

责任编辑: 祝为平 赵静蕊 王 杨

中国三峡出版社出版发行
(北京市西城区西廊下胡同 51 号 100034)
电话: (010) 57082645 57082655
[http: //www. zgsxcbs. cn](http://www.zgsxcbs.cn)
E-mail: sanxiaz@ sina. com

北京华联印刷有限公司印刷 新华书店经销
2018 年 1 月第 1 版 2018 年 1 月第 1 次印刷
开本: 787 × 1092 毫米 1/16 印张: 16. 5
字数: 364 千字
ISBN 978 - 7 - 5206 - 0010 - 1 定价: 158. 00 元

序 言

从 1912 年我国首座水电站机组投产发电至今，我国水电事业已走过百年发展历程。一个多世纪以来，我国水电从无到有，从小型机组到中型再到巨型，从单座电站到流域水电集群，从依靠技术引进到具备自主知识产权设计制造、安装、运行管理百万级巨型水轮发电机组，中国水电走出了一条波澜壮阔的创业发展之路。

随着我国电力行业发展进入新常态，能源供给方式的多样化发展，伴随着能源结构调整、电力体制改革不断深入推进，电力生产将更加注重市场需求、效益提升与设备的本质安全，这都对水电发展带来新的巨大挑战。

如何做好供给侧改革下的平稳过渡？如何在电力体制改革浪潮中继续保持好水电行业优势？这就反过来要求水电站不仅要提供“物美价廉”的电能产品，而且对水电机组可靠性、稳定性提出了更为严苛的要求。特别是在水轮发电机组“巨型化”发展的趋势下，探究巨型水轮发电机运行检修规律，掌握其核心运维管理技术，显得尤为重要。

总结是进步的阶梯。要想把握水电发展脉搏，不仅要掌握行业新理念、新知识和新技术，还要会总结过去可借鉴、可复制的优秀设备管理技术和行业经验。才能更好地将安全牢牢掌握在自己手中。

本书的编者在水电站长期从事大型水轮发电机组运行、检修工作，积累了丰富的现场核心技术实践与管理经验，对大型水轮发电机组的机械常见故障及问题经过系统性总结和提炼，形成了这本颇具指导和借鉴意义的学术专著。

本书所含内容丰富全面，前 6 章主要介绍了包括水轮机、发电机、调速系统、在线监测系统、辅助设备在内的水电站常用系统设备机械维护技术，在描述问题的同时都一一给出了通过自身实验验证的优化建议，第 7 章详细归纳了巨型机组重要技术研究项目，科学严谨、论证清晰。

受编者躬耕水电、致力于水电技术推广之精神的赞许，寥做数语，是之为序。

中国长江电力股份有限公司总经理



目 录

第 1 章	巨型混流式水轮发电机组技术现状	1
第 2 章	水轮机机械设备维护技术研究	3
2.1	机组顶盖密封结构不宜采用单一的 O 型密封条结构	3
2.2	机组蜗壳测压引水管设计时应考虑蜗壳的变形	4
2.3	蜗壳及尾水盘型阀阀盘应采用金属结构密封	6
2.4	主拐臂与上轴套之间的抗磨块宜采用更合理的布置方式及安装数量	6
2.5	机组蜗壳进人门需完善的管理及技术措施	7
2.6	混流式机组宜在适当位置设置检修水源	8
2.7	中轴套上端的密封应设计为组合型密封结构	8
2.8	机组压力钢管伸缩节导流板应设置成小板配合结构	9
2.9	大轴补气阀不宜选用油缓冲结构形式	10
2.10	转轮止漏环不宜采取热套方式安装或将止漏环与转轮一体加工	12
2.11	机组大轴补气管应采取合适的防结露措施	13
2.12	大轴补气阀需设置定位销及定期更换弹簧	13
2.13	盘型阀进水口前需设置合适拦污栅	14
2.14	机组各进人门试水阀应设计统一规格, 并采用不锈钢材质管路及阀门	14
2.15	顶盖强迫补气管应采取焊接方式连接并增设固定支架	14
2.16	对检修过程中需运行的设备应设置一路检修供电电源	15
2.17	机组顶盖支臂间排水连通孔尺寸需与排水泵流量匹配	15
2.18	机组各部位螺栓应采取防腐措施	16
2.19	机组平压管应设计成不锈钢材质	16
2.20	水车室内的爬梯宜设计为平踏步并做防滑处理	16
2.21	机组水导外循环油过滤器宜设计成双筒型式	16
2.22	机组水导外循环油泵控制逻辑应考虑循环管路油流量	17
2.23	水导循环油泵联轴器应设计观察孔	17
2.24	水轮机水导不宜采用无轴领结构	18
2.25	油冷却器管路串并联结构应设计为可选择方式	18
2.26	水导油槽结构优化研究	19

2.27	水导油槽管路布置应考虑便于日常维护检查	20
2.28	某机组水导油槽密封渗漏研究及优化	21
2.29	水车室人行环道及设备表面作防滑处理	24
2.30	机组主轴密封水箱应设计观察孔	24
2.31	主轴密封机械磨损指示装置应设计为刚性结构	24
2.32	主轴密封供水支管的设计应综合考虑材料与连接方式	25
2.33	主轴密封供水软管接头不宜采用卡套式接头	25
2.34	主轴密封过滤器选型需综合考虑结构和排污方式	26
2.35	主轴密封供水管路上的逆止阀应选择带预紧压力结构	27
第3章	发电机机械设备维护技术研究	28
3.1	磁极极间连接拉紧螺杆固定块背部应加装绝缘堵板	28
3.2	顶转子系统管路接头宜采用统一规格	29
3.3	振动环境中管道定子冷却系统不宜采用管箍结构连接	29
3.4	定子上方的环形管道宜采用一点接地方式	30
3.5	各部轴承油槽采取有效的防油雾措施	30
3.6	机组各部轴承需设计油位测量孔	30
3.7	机组推导外循环冷却系统应设计备用油泵	31
3.8	机组推导冷却系统需设计油流量计	31
3.9	自泵油循环冷却系统的导瓦出油管与环管连接管路不宜采用橡胶软管	31
3.10	高压油减载系统需设计压力传感器	32
3.11	发电机顶转子系统需设计回油箱	32
3.12	机组风洞内部冷却水管路应设置防结露措施	33
3.13	机组推导冷却系统需设计油流量计	33
3.14	发电机空气冷却器进出水支管设计成橡胶伸缩节	33
3.15	推导外循环冷却器差压计管路接头不宜采用卡箍式	34
3.16	机组地面管路应考虑防踩踏措施	35
3.17	应设计从机组上架盖板进入转子上表面的爬梯	36
3.18	冷却水管路宜采取有效防结露措施	36
第4章	调速系统机械设备维护技术研究	37
4.1	调速系统循环过滤设计为静电滤油装置	37
4.2	调速器压油泵加卸载指示机构可设计为压力开关形式	37
4.3	机组压力表、压力传感器前端应设计表前阀	38
4.4	调速器油泵卸载管路应设计手动阀门	39
4.5	调速器自动补气装置应设检修阀	39
4.6	接力器及管路应设计漏油箱及排油泵	41
4.7	机组接力器推拉杆上方需设计走道	41

4.8	调速系统隔离阀切换手柄应增加锁锭止动装置	41
4.9	调速系统阀组控制油应与操作油分离	43
4.10	机组集油槽冷却器冷却水管应采用不锈钢材料	44
4.11	检修漏油箱排油泵不建议采用离心泵	44
4.12	调速器系统压力油罐应设置手动供油总阀	44
4.13	调速器集油槽循环过滤器进出油口分区设置	45
第5章	在线监测系统设备维护技术研究	47
5.1	振摆监测系统压力脉动测压管前设计阀门	47
5.2	二次系统盘柜显示器规格选型应统一	47
5.3	具有相似功能的二次系统选用一套系统	47
5.4	二次系统设计应总体规划、统一布线	48
5.5	具有相同功能的传感器规格选型应统一	48
5.6	在线监测系统应接入监控及分析系统	48
5.7	趋势分析系统应设自动记录表单功能	48
5.8	机组应设气隙检测并接入设备诊断系统	49
5.9	机组上导摆度传感器不宜安装在转子上方	49
第6章	辅助设备维护技术研究	50
6.1	技术供水滤水器排污管应加装放空阀	50
6.2	技术供水滤水器出口蝶阀安装方向应设计为逆水流方向	50
6.3	技术供水滤水器排污总阀宜选用弹性座闸阀	50
6.4	技术供水系统加装二级减压阀	51
6.5	技术供水系统空冷器冷却水需设计正反向供排水结构	51
6.6	技术供水系统应设计检修平台	51
6.7	厂房应考虑设计清洁池	51
6.8	深井泵润滑水系统应当增加备用润滑水装置	51
6.9	技术供水蜗壳取水口拦污栅宜采用立体结构	52
6.10	埋管宜采用不锈钢管	52
6.11	低转速电动机宜采用润滑脂润滑	52
6.12	调速系统液压油系统设为独立系统	53
6.13	储气罐应设计自动排污阀	53
6.14	封闭母线微正压供气系统宜采用无油空压机	53
6.15	室内空压机应设计通风或空调系统	53
6.16	布置有设备的廊道宜采用风管通风	53
6.17	中央空调风管宜采用彩钢风管	54
6.18	水电站中央空调系统可采用冷水机组	54
6.19	大湿度环境下螺杆式空压机运行方式调整及结构优化	54

第7章 重要技术研究项目总结	55
7.1 冬季机组开机后水导瓦温变化规律研究	55
7.2 某机组导叶拒动处理技术研究	58
7.3 推导油槽油位季节性报警研究	62
7.4 某型号机组特殊振动归纳分析	68
7.5 机组推力瓦温随水头变化规律分析	72
7.6 电站机械设备国产化研究	84
7.7 某机组推力头与镜板连接专项处理研究	86
7.8 压力钢管伸缩节导流板撕裂处理研究	89
7.9 技术供水系统正反向倒换操作方法研究	92
7.10 隔膜式消防雨淋阀阀芯卡滞处理研究	93
7.11 机组噪声测试研究	95
7.12 机组动平衡配重经验技术研究	124
7.13 主轴密封断水试验经验研究	126
7.14 巨型混流式机组过流部件防腐处理研究	128
7.15 巨型混流式机组接力器剖分式活塞杆密封运用研究	137
7.16 机组风洞油雾治理研究	145
7.17 发电机定子挡风板研究	153
7.18 新型水轮机检修密封运用研究	166
7.19 某机型转轮叶片的修型优化研究	169
7.20 某机型大轴补气管末端段有无对机组影响研究	173
7.21 运用于机组大轴补气管的防结露技术研究	184
7.22 巨型混流式机组推导轴承在线监测系统研究	188
7.23 调速系统控制技术升级研究	199
7.24 巨型混流式机组 700Hz 振动研究	207
7.25 机组推力瓦油膜厚度与高压油减载系统压力关系研究	216
7.26 巨型混流式机组微正压供气系统气源改善研究	226
7.27 巨型机组推导冷却系统研究	232
7.28 机组水导油槽下挡油环密封优化研究	244

第1章 巨型混流式水轮发电机组 技术现状

近年来，我国水电设备制造业有了长足的进步，在混流式、轴流式和贯流式水轮机组的设计、制造和安装等方面，已步入世界先进行列。在振兴民族制造业中，我国充分发挥了国家重大工程对水电科技创新和重大技术装备创新的带动作用，特别是依托三峡工程的建设，创立了“中国特色水电设备国产化的模式”，指导着我国水电设备制造业顺利发展，走出了一条装备国产化的成功道路。

我国依托国家重大工程项目，以强大的市场需求吸引国际一流制造商，在采购先进设备的同时，引进关键技术消化、吸收、再创新，提出了以三峡为代表的大型水电机组攻关计划。先后建立起多个高水头水力试验台，系统进行水轮机试验研究，同时建立了1000吨级、3000吨级推力轴承试验台，开展了6000吨级推力轴承的试验计算研究，极大程度上促进了我国水电设备制造业的发展。

三峡工程的机组单机容量 $70 \times 10^4 \text{kW}$ ，是当时世界上最大机组，最大出力 $85.2 \times 10^4 \text{kW}$ ，且尺寸大、参数高，转轮直径达10m，运行水头变幅达50m，再加上河流含沙量大，设计和机组制造的综合难度大，具有世界挑战性。1996年初，中国工程院专家提出了《三峡工程发电设备的进口——我国水力发电设备制造业的持续发展》的报告：1. 在三峡电站机组招标书的有关条款中，强调在与外商合作中中国厂家的地位；2. 引进设备的技术转让，最后必须落实到中国的制造厂家；3. 在与外商合作时，必须强调中国技术人员参与联合设计的全过程，中国厂家尽早投入机组关键部件的制造等。在我国专家的建议下，国务院作出走“技贸结合、技术转让、联合设计、合作生产”的决定。三峡工程创造了数百项工程科技世界之最，使我国大型水电设备制造业仅用7年时间就实现了30年的大跨越。

经过三峡电站、龙滩、小湾电站建设和 $70 \times 10^4 \text{kW}$ 机组的成功投产，我国已具备独立自主进行设计和制造的能力。目前， $80 \times 10^4 \text{kW}$ 和 $100 \times 10^4 \text{kW}$ 机组在乌东德和白鹤滩电站的设计计划已落到实处，相关设计实验已完成，全球最大的百万千瓦级机组将在白鹤滩电站建设运行。这些主要特大型水电站容量大，相应单机容量也大，总装机容量达196875MW，在我国水电开发中具有十分重要的地位。

20 世纪 80 年代以来,在认真执行国家水电发展规划、吸收国外先进技术的基础上,我国水电装备的设计、制造、安装和运行技术水平已有明显进步,实现了较大的飞跃。刘家峡、龙羊峡和岩滩等一批单机容量 $30 \times 10^4 \text{kW}$ 左右水轮发电机组相继投产发电;单机容量 $40 \times 10^4 \text{kW}$ 的李家峡,单机容量 $55 \times 10^4 \text{kW}$ 的二滩,特别是单机容量 $70 \times 10^4 \text{kW}$ 三峡电站机组和龙滩电站 $70 \times 10^4 \text{kW}$ 机组成功投运,有力证明了我国水电机组的设计、制造正逐步全面达到世界先进水平。

在设备选型、参数设计和枢纽机电布置上,我国已具有容量 $84 \times 10^4 \text{kVA}$ 、推力轴承负荷达 5500tf (吨力,是工程单位中力的主单位,表示 1t 的力)、转轮直径 10.6m 的三峡混流式机组;最大水头 189.2m、单机容量最大出力 $61 \times 10^4 \text{kVA}$ 、空冷每极容量达 14.57MVA、转轮直径 6.247m 的二滩混流机组;转轮直径达 8.3m、居世界第三的五强溪水轮机;额定容量 $20 \times 10^4 \text{kW}$ 、转轮直径 8m、推力轴承负荷达 4100tf、世界单机容量最大、水头最高的水口电站轴流机组;最大水头 637.2m、额定出力 $12 \times 10^4 \text{kW}$ 、转轮直径为 2.6m 的冶勒电站冲击式机组;采用世界最先进的蒸发冷却技术单机容量 $70 \times 10^4 \text{kW}$ 的三峡地下电站水轮发电机。这些成绩系统反映了我国水电机组的制造能力和设计水平。

大型混流式机组,随着三峡电站的引进吸收,技术上已全部实现国产化。目前,我国共有 150 余台大型混流电机组在运行、安装和设计制造中,详情见表 1-1。

表 1-1 我国各大型混流机组运行安装情况

序号	水电站	单台装机 (kW)	台数 (台)	总计装机 (kW)
1	三峡水电站	70 万	32	2240 万
2	溪洛渡电站	77 万	18	1386 万
3	向家坝电站	75 万	8	600 万
4	白鹤滩电站 (在建)	100 万	16	1600 万
5	乌东德电站 (在建)	85 万	10	850 万
6	小湾电站	70 万	6	420 万
7	龙滩电站	70 万	7	490 万
8	拉西瓦电站	70 万	6	420 万
9	龙盘 (上虎跳) 电站	70 万	6	420 万
10	金安桥电站	60 万	6	360 万
11	锦屏一级电站	60 万	6	360 万
12	锦屏二级电站	60 万	8	480 万
13	糯扎渡电站	65 万	9	585 万
14	观音岩电站	60 万	5	300 万
15	瀑布沟电站	55 万	6	330 万
16	构皮滩电站	55 万	6	330 万

第2章 水轮机机械设备维护技术研究

2.1 机组顶盖密封结构不宜采用单一的O型密封条结构

问题描述：某机组顶盖与座环密封采用O形密封，机组座环为焊接金属结构件，其与顶盖相对间的密封面为非精加工面，同时座环安装为土建安装，受运输吊装及混凝土浇筑等因素影响，导致座环严重变形，安装现场为保证圆度要求，常采用切割打磨方式进行处理，从而导致座环与顶盖形成的密封槽波浪度大、宽度不均匀、密封槽光洁度差，O形密封无法提供足够补偿量，安装时易将密封损伤，同时水轮机活动导叶前水压力变化大，顶盖产生振动，密封长时间运行老化而产生漏水情况。

优化建议：结合现场顶盖O形密封使用的环境情况，将顶盖与座环密封结构设计成新的组合型密封，采用Y形密封和哑铃型密封的组合形式（亦可进行其他类型的组合密封结构），这样能最大限度地补偿密封槽的不均匀度所带来的漏水风险，

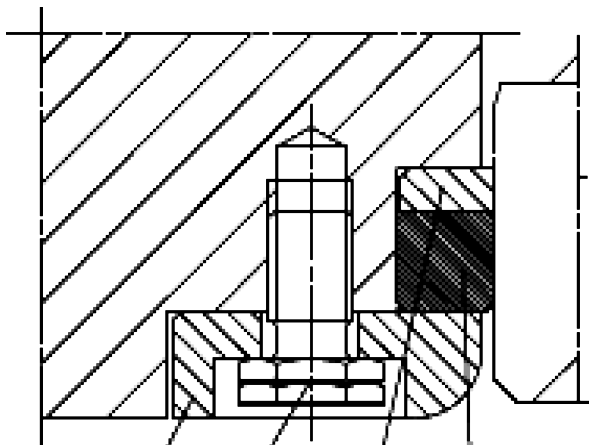


图2-1 原顶盖密封结构采用底部“垫板+O形密封圈”的结构形式

同时针对各电厂水质的特性，采用相对适用的新型材料，能够延长顶盖密封的使用寿命和抗氧化性。在三峡的巨型机组上，已对部分机组进行了密封结构的换型，通过跟踪对比换型前后机组运行情况，大大减少了顶盖渗水的概率和降低顶盖排水泵的启动次数。换型之前，顶盖排水泵约每天需启动一次，换型后，顶盖渗水极小，顶盖排水泵基本不需运行，换型效果明显，值得在其他电站或机组上进行推广。

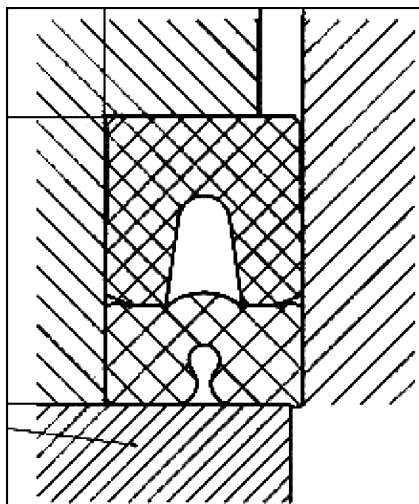


图 2-2 目前采用新型密封结构

2.2 机组蜗壳测压引水管设计时应考虑蜗壳的变形

问题描述：当前水电站蜗壳测压管分布在分段焊接的蜗壳压力钢管上，用来监测蜗壳中各断面的压力分布情况，同时也为其他监测软件提供数据，进而换算蜗壳中水流的流量。巨型机组普遍采用金属蜗壳，压力钢管在机组充水、排水的过程中随着水压的上升和下降会发生膨胀变形，导致蜗壳压力钢管中的测压引水接头出现裂缝、脱焊等情况，致使蜗壳测压管漏水，漏水渗漏至压力钢管与混凝土之间的间隙，从蜗壳进入门处渗出。由于此类蜗壳测压管为预埋件，随蜗壳安装时接入，一旦出现渗漏，将无法进行修复更换，为了防止漏水以及缺陷进一步扩大，只能在蜗壳内部对蜗壳测压引水口进行封堵，这最终导致蜗壳内部测压功能的弃用。

优化建议：机组在设计时充分考虑压力钢管变形量，在与压力钢管连接部位预留足够缓冲空间，防止压力钢管变形对测压引水接头的损伤，对引水管路采用不锈钢管材质，避免由于锈蚀、伸缩变形导致的连接部位渗漏。

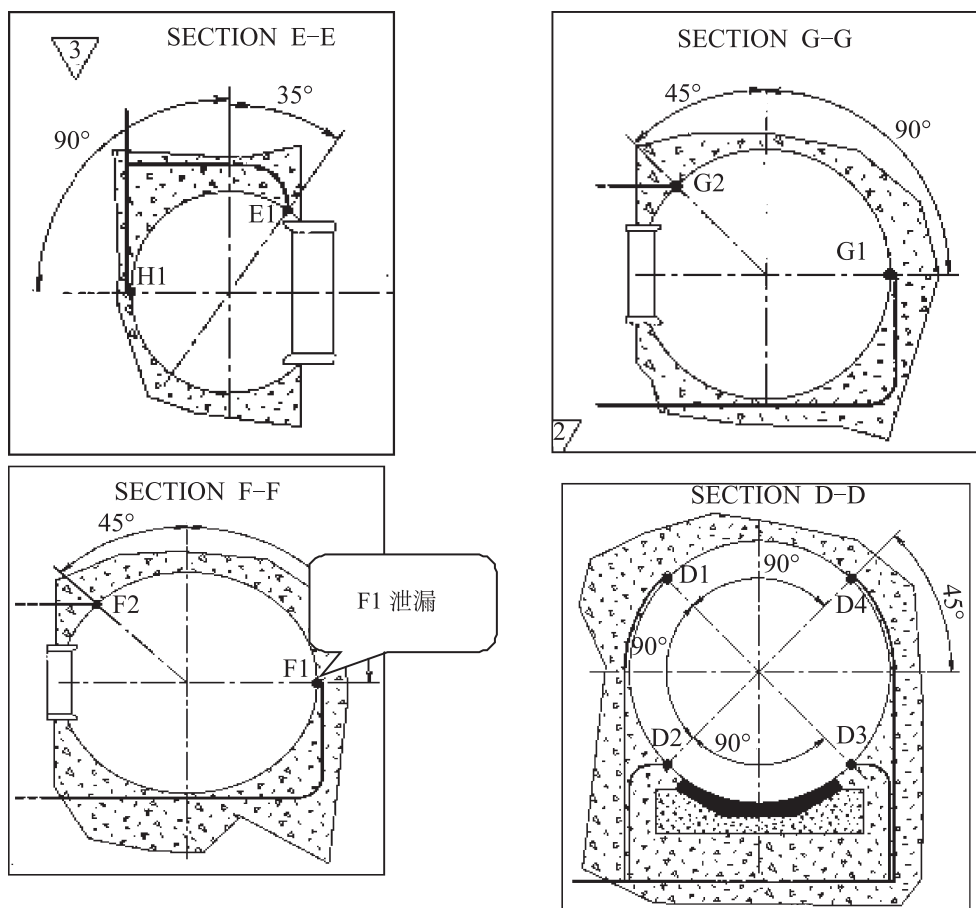


图 2-3 测压管布置及某个部位渗漏



图 2-4 对渗漏测压管入口进行封堵后

2.3 蜗壳及尾水盘型阀阀盘应采用金属结构密封

问题描述：机组盘型阀包括蜗壳盘型阀以及尾水盘型阀，其作用是通过开启盘型阀作为排水通道，将蜗壳或尾水管内的水流排走。某机组尾水盘型阀阀盘密封设计时选用橡胶密封，并通过紧固方式安装在阀盘上，由于阀盘开启后，水流的巨大冲力，容易导致阀盘密封脱落损坏。其中某机组在排水时检查发现阀盘密封从密封槽中脱出，阀盘橡胶密封条被盘型阀切断，密封条卡在阀盘位置，导致盘型阀关闭不严发生漏水情况。



图 2-5 橡胶材质的盘型阀密封脱落情况

优化建议：建议蜗壳及尾水盘型阀阀盘密封设计时采用金属密封形式或采用新型橡胶密封，并采用可靠方式进行紧固，结构设计应考虑更换维护的便利性，以便于在盘型阀密封出现故障或损坏后能够稳妥快捷地进行更换和处理，同时可以避免机组在运行过程中橡胶密封易老化及损坏导致大量漏水，影响机组安全运行的情况发生。

2.4 主拐臂与上轴套之间的抗磨块宜采用更合理的布置方式及安装数量

问题描述：某类型机组导水机构在机组运行过程中均出现了活动导叶下沉、端

面间隙分配关系改变这一异常现象。由于活动导叶下沉，致使这部分活动导叶的下端面间隙为0mm，活动导叶在运动中将底环上表面及活动导叶下端面密封严重刮伤。后来通过分析发现，出现导叶下沉，其部分原因是该类型机组主拐臂与上轴套之间抗磨块在运行过程中出现严重磨损所致。该机型主拐臂与上轴套之间的抗磨块仅有两块，对称分布，导叶在动作过程中出现转动部件不在一个水平面的情况，使得单个抗磨块受力过大，长期运行，抗磨块在受力较大情况下磨损，导致了悬挂式活动导叶的下部端面间隙变小。

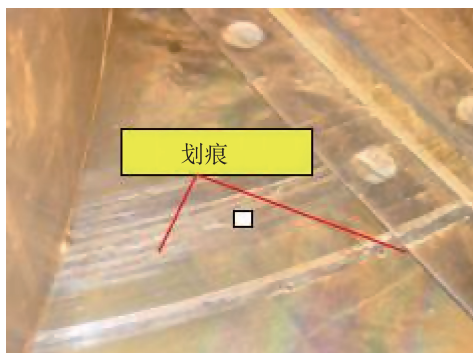


图2-6 活动导叶下沉后底环刮痕

优化建议：为了降低单块抗磨块的承受力，使得活动导叶的重量均匀分布，避免由于受力不均带来的抗磨块磨损，宜采取多块分布方式，增加抗磨块数量至4块，并圆周对称分布，安装后严格控制抗磨块的水平度，确保活动导叶的转动受力均匀，转动水平，并在岁修期间加强对活动导叶的间隙测量和跟踪，以便于对抗磨块运行情况进行分析处理。

2.5 机组蜗壳进人门需完善的管理及技术措施

问题描述：部分机组蜗壳进人门采用外开式，其由若干颗螺栓进行把合，在机组运行过程中，蜗壳进人门位置长期承受蜗壳压力脉动对其冲击，蜗壳门螺栓长期在振动工况下运行，一旦出现局部螺栓断裂将产生多米诺效应，最终导致蜗壳门脱落，严重影响机组的安全运行，且存在水淹厂房的风险。

优化建议：针对外开式蜗壳进人门，宜制定专项作业指导书，要求进人门螺栓使用力矩扳手进行把合，并严格遵守螺栓的预紧力矩，严禁只用打击扳手进行打击紧固，同时严格执行三级验收制度，把好安装质量控制。另外对关键部位螺栓采用一次性更换制度，防止螺栓在多次使用后出现内部缺陷运行过程中的断裂情况。在蜗壳进人门上设置防开启装置，增加进人门的保护，确保螺栓出现损坏后，蜗壳门亦存在后备保护，避免出现水淹厂房情况。

2.6 混流式机组宜在适当位置设置检修水源

问题描述：当前水电站设计时，消防用水、技术用水和日常生活用水均考虑完备，但常需使用水源的水车室、风洞外围和蜗壳进入门处均未设置机组检修水源，导致机组检修用水时（比如清洗蜗壳、渗漏实验、设备打压试验等），往往需要较远距离取水，给设备检修带来诸多不便，也降低了检修效率。

优化建议：在进行机组设备设计时，把检修用水加入到消防用水或者生活用水的一部分中，进行合理设计，在用水部位布设水源管路，并增设相应阀门接头，便于在检修过程中取用水源进行相应的工作，提高检修效率。

2.7 中轴套上端的密封应设计为组合型密封结构

问题描述：某机型机组的中轴套上端密封采用了 O 形密封结构，O 形密封由于其本身的特性，补偿量较小，且在相对旋转工况下容易出现磨损情况，机组在运行一段时间后，发现导叶中轴套出现了漏水现象，且漏水量突然变大，需要一台顶盖排水泵一直运行才能维持顶盖水位不上涨，如果中轴套漏水量大于顶盖排水泵和自流排水总排水量时，可能造成水淹水导，严重影响机组的安全运行。中轴套与导叶轴之间有相对旋转运动，密封性质属于接触性动密封，当蜗壳充满水时蜗壳的压力水可能通过唇形密封往上渗漏，而中轴套上端的 O 形密封存在密封容易老化、磨损且补偿不足等缺点，长时间运行后导致中轴套出现漏水现象。

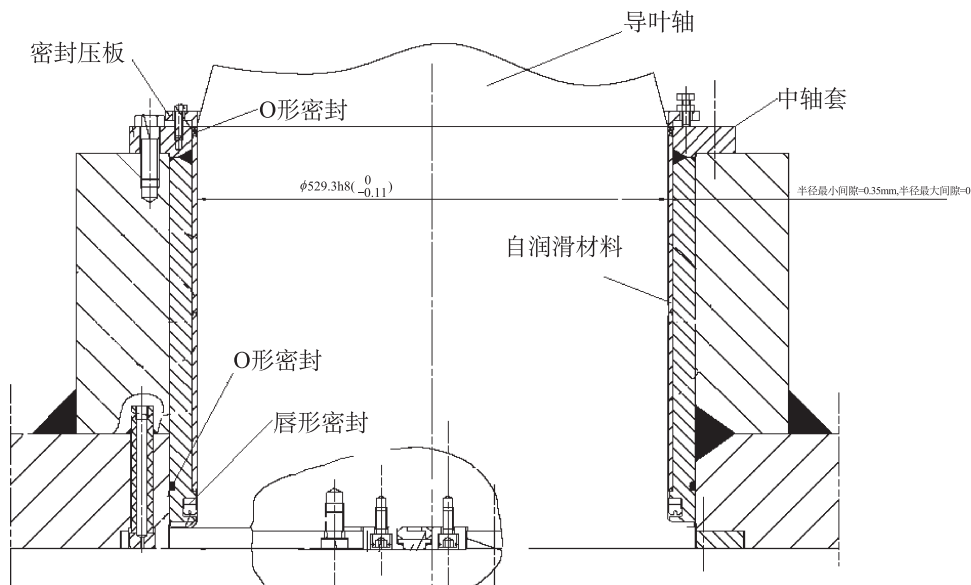


图 2-7 原中轴套上端密封结构

优化建议：在对中轴套渗水情况进行分析研究后，在其他类型机组中轴套密封采用 V 形组合密封结构进行试验，跟踪试验效果，其在运行过程中效果良好，未出现漏水情况，并测绘其运行相对磨损及补偿失效数据，均比原 O 形密封圈效果更好。根据研究对比试验，可对机组中轴套上端的密封设计成剖分式 V 形密封，既保证机组在蜗壳充水和运行时的密封效果；另一方面，采用剖分式结构密封，也能够大大提高密封更换效率，大大减少了更换密封所需要拆卸的其他附件，可在只拆卸密封压板的条件下进行密封更换，提高检修效率。

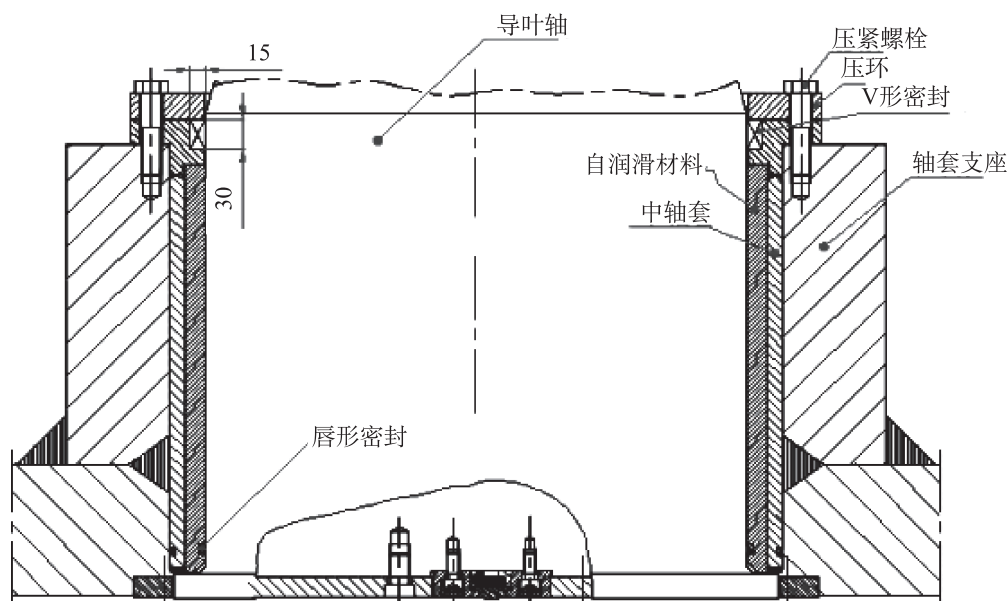


图 2-8 采用 V 形组合密封结构的中轴套密封

2.8 机组压力钢管伸缩节导流板应设置成小板配合结构

问题描述：某机组伸缩节结构形式为波纹管加橡胶水封密封的套筒式伸缩节。伸缩节由上下游内套管、外套管、波纹管、水封装置（水封填料、压圈及限位装置）等组成。运行过程中发现导流板出现撕裂现象，固定螺栓出现断裂缺失，更有个别机组出现整板脱落。

优化建议：1. 水流脉动压力引起导流板振动，应该在导流板上进行抗振和减振处理。如减小导流板尺寸，在连接螺栓杆上增加弹簧垫圈或碟簧等措施进行耗能。

2. 原安装的导流板，上下游间螺栓固定的支点距离较大，而中间正好存在一个与外套管之间的空隙，当水流出压力脉动时，空隙两侧的水压会有差异变化，因此可在中间处增加螺栓固定点，缩小上下游间的支点距离。

2.9 大轴补气阀不宜选用油缓冲结构形式

问题描述：某机组大轴补气阀采用的是以液压油作为缓冲介质，在缓冲活塞缸上钻制截流孔，当该阀工作时，活塞随阀盖一起下移，产生液压油阻力，导致补气不流畅（即补气有阻力）；补气结束后，阀盖在弹簧作用下回弹时，缓冲油对活塞有阻尼，同时给缓冲油加压，常常伴有缓冲油泄漏现象。大轴补气阀采用油缓冲结构形式，机组运行一段时间以后，由于缓冲装置的长期往复运行，密封件出现老化磨损情况，导致缓冲油逐渐减少，补气阀无缓冲，补气阀多个部件出现损坏。

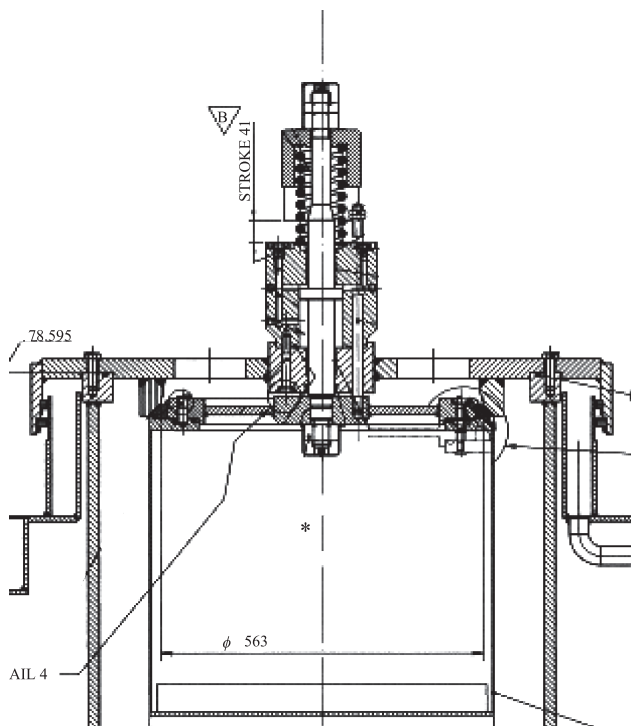


图 2-9 原大轴补气阀结构

优化建议：在原补气阀基础上改进缓冲结构，将原油缓冲方式补气阀本体组件拆除，更换为新型气缓冲补气阀，此类型大轴补气阀在其他类型机组上使用效果良好，能有效避免当前结构所带来的问题。此系列补气阀采用空气压缩缓冲专利技术，补气阻力和关闭阻力极小。缓冲活塞上设有几个空气反弹截止阀，当缓冲活塞下移时，空气反弹截止阀全部打开，空气迅速进入缓冲腔；反弹时，空气反弹截止阀全部关闭，对空气进行压缩来实现缓冲后关闭。另外新补气阀轴与缓冲活塞采用了万向连接器，所以动、静部套的同心度极好，不会出现卡塞现象。阀盖关闭时很严，所以主轴内部空气不会泄漏，这样缓冲装置可以长期免维护（空气不需补充）。同



图 2-10 补气阀在运行过程中出现的损坏

时浮筒下面采用了球形设计，对上涌的水力冲击也有很好的缓冲效果，即使上涌的水冲击力很大，对浮筒向上的作用力也被分解，阀轴的轴套也采用的是单轴套自润滑密封形式，能够有效降低摩擦力对密封的磨损。

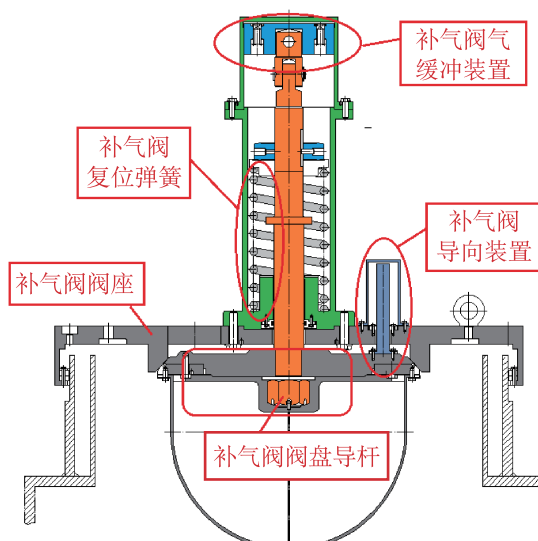


图 2-11 新型气缓冲结构大轴补气阀

2.10 转轮止漏环不宜采取热套方式安装或将止漏环与转轮一体加工

问题描述：某机组转轮转动止漏环在工厂分三瓣拼焊加工后，通过热套安装到转轮上，其收缩量为 5 ~ 6mm，转动止漏环材料是 X3CrNiMo13 - 4（国标：04Cr13Ni5Mo），材料硬度 $200 \leq \text{HB} \leq 300$ 。上转动止漏环外径 $\phi 9315\text{mm}$ ，最小内径 $\phi 9226\text{mm}$ ，具体尺寸见图 2 - 12。

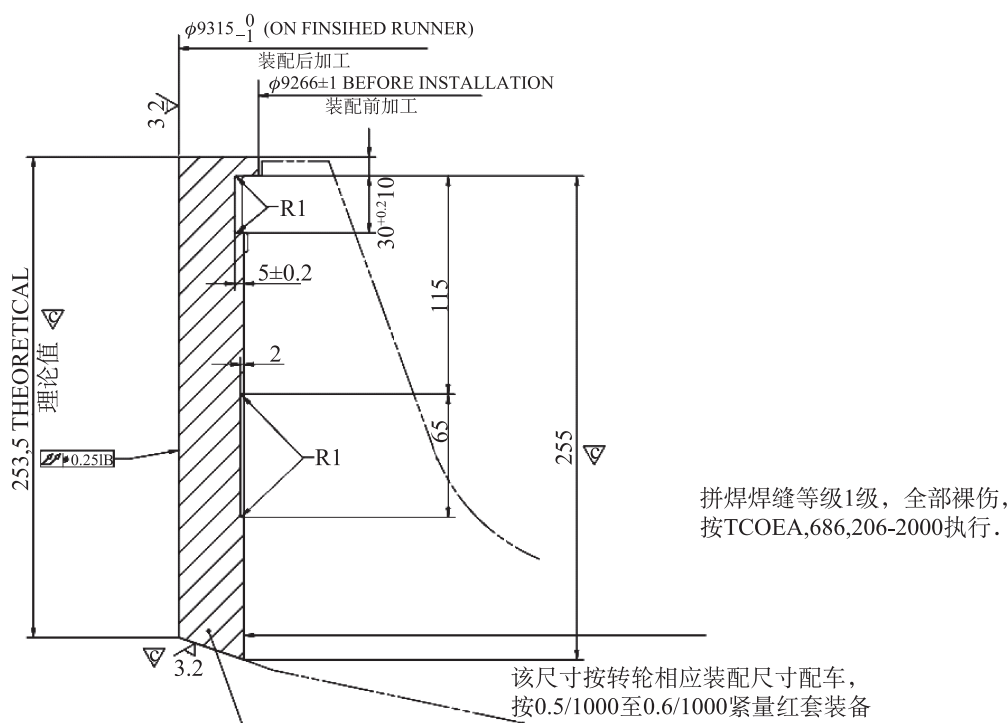


图 2 - 12 上冠止漏环

固定止漏环材料为 ASTM A240 UNS S41000（国标：12Cr13），材料硬度 $200 \leq \text{HB} \leq 300$ 。上固定止漏环在工厂里分瓣焊接在顶盖上（采用奥氏体焊条），下固定止漏环通过上下两层螺栓把合在底环上。顶盖和底环在工地组装后，对止漏环接缝进行封焊、打磨（如图 2 - 13）。

部分该类型的止漏环发生过断裂掉落，直接导致了止漏环卡在转轮叶片上，导致运行水力状态极不平衡，对机组产生激烈震动。

优化建议：对类似转轮止漏环改变结构方式，采取其他方式对止漏环进行焊接加固，不使用热套工艺，另外由于目前加工技术的提高，设计及材料均上一台阶，直接取消外加式止漏环，在转轮上直接精确加工配合间隙，实现止漏环功能。

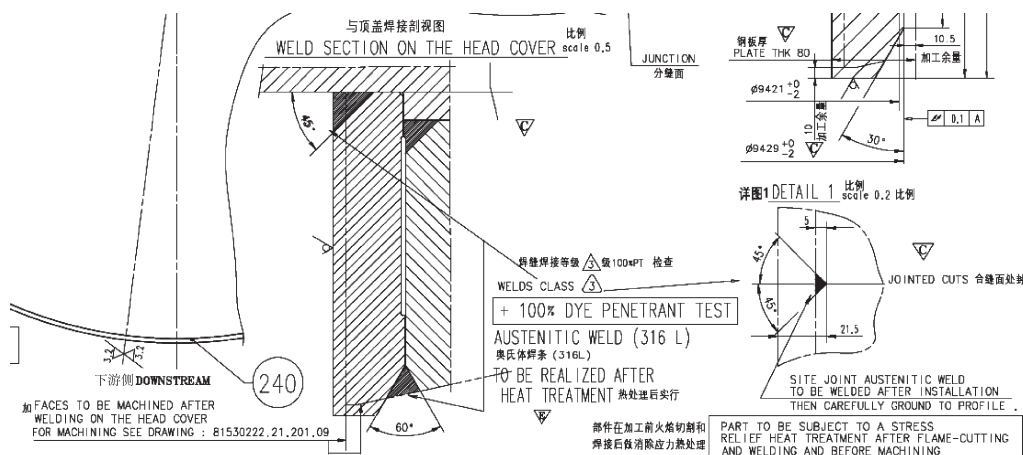


图2-13 下固定止漏环

2.11 机组大轴补气管应采取合适的防结露措施

问题描述：机组大轴补气管布置在水轮发电机大轴中心部位，上端位于滑环室，下端位于转轮中心，中间通过加固环、支撑环进行固定安装。大轴补气管在运行过程中，如果在转轮出口位置的压力真空时进行补气，在停机过程中出现反水压时，尾水进入大轴补气管，停机备用时，大轴补气管水位与尾水位齐平。由于大轴补气管内外存在温差，容易在大轴补气管外部（大轴补气管与大轴间）形成结露，导致发电机励磁引线绝缘能力降低的，绝缘报警，影响机组运行安全。

优化建议：为了防止大轴补气管外壁出现防结露情况，可通过对大轴补气管表面采取防结露措施，通常采用的有2种方法，其一便是采用包保温层；其二便是涂刷防结露涂料，目前2种方式均已采用。其中刷防结露涂料方式通过对比试验，目前效果良好，在运行后未出现脱落和结露情况，可进行推广实施，因为刷防结露涂料较包扎保温层具有施工难度低，运行后风险小，使用时间较长等优点。

2.12 大轴补气阀需设置定位销及定期更换弹簧

问题描述：某机型大轴补气阀原设计的安装方式是补气阀下法兰与补气管上法兰用螺栓连接。该结构未设计定位销，不利于补气阀的检修后的回装定位，不能很好地保证补气阀下法兰圆周边沿与渗漏排水槽之间的圆周间隙。在补气阀每次检修完毕回装时，需重新调整补气阀下法兰圆周边沿与渗漏排水槽之间的圆周间隙。检修工作量大。另外，由于补气阀内控制阀盘行程的弹簧张紧力过大，在机组运行中进行大轴补气时，阀盘不能正常打开，机组不能正常补气。造成机组在运行时震动

和噪声大，影响机组的正常稳定运行。

优化建议：1. 在补气阀下法兰和补气管上法兰组合面，对称方向加工两个圆锥销孔，安装两个圆锥定位销。圆锥销的加工分度圆与法兰面连接螺栓孔分度圆为同一分度圆。圆锥销孔中心在补气阀下法兰和补气管上法兰组合面相邻两螺栓孔中心距的正中。

2. 更换补气阀内控制阀盘行程的弹簧，减小控制弹簧的张紧力。使补气阀在进行大轴补气时，阀盘可正常打开，保证机组运行时能够正常补气。减小机组运行时的震动、噪声，以达到保证机组正常、稳定运行。

2.13 盘型阀进水口前需设置合适拦污栅

问题描述：某机型蜗壳及尾水盘型阀进水口前未设置拦污栅，这将导致蜗壳内水中垃圾及杂物进入到盘型阀阀盘位置，导致盘型阀关闭过程中出现卡阻情况，盘型阀关闭不严，出现漏水情况。

优化建议：在盘型阀进口前合适位置设置相应的拦污栅，拦截垃圾进入阀盘位置，阻挡杂物，确保盘型阀排水及关闭顺利。

2.14 机组各进人门试水阀应设计统一规格，并采用不锈钢材质管路及阀门

问题描述：由于机组安装属于不同机型，安装单位也不相同，导致不同机组各试水阀不一致，部分采用非不锈钢管，在运行多年后出现锈蚀穿孔及漏水情况，且此位置压力为蜗壳水压，一旦出现试水管锈蚀穿孔情况，将严重影响机组运行安全，且其维护措施需要进行排水处理，维护成本较高，严重威胁机组运行安全。

优化建议：对类似重要部位的引水管路选择不锈钢材质，并设置不锈钢阀门，阀门末端设置堵头，防止阀门位置偏离漏水。

2.15 顶盖强迫补气管应采取焊接方式连接并增设固定支架

问题描述：部分机组对与顶盖上腔强迫补气管采用螺纹连接方式，部分支管与总管连接部分较长，容易造成补气管在运行过程中，随着顶盖振动，出现断裂情况，导致顶盖喷水，严重影响机组安全运行，某机组在运行中就出现了断裂，导致顶盖内水位急剧上涨被迫停机。

优化建议：根据不同机型的现场实际情况，采用焊接加固方式，另外在设计之初，设计厂家可对顶盖内强迫补气管设计为焊接方式连接，并增设管支架防止纸管过长，在运行过程中长期的震动导致疲劳破坏。

2.16 对检修过程中需运行的设备应设置一路检修供电电源

问题描述：目前在进行水轮机设备设计时，均考虑了顶盖排水泵、漏油箱及排油泵、检修环形吊车等，这些设备的供电电源设计时电源均取自水轮机动力盘柜，在进行机组检修时，需要对动力盘柜内的动力电源进行断开隔离措施，这样就导致前面提及的检修环形吊车等失去动力，无法在检修期间进行运行操作，而此类设备往往在检修期间需要投入使用，这就使这类设备功能无法充分发挥，无法满足现场设备检修要求。

优化建议：对顶盖排水泵、漏油箱排油泵、检修环形吊车等类似设备采用两路电源供电，一路取自动力盘柜内，另一路取自检修电源，并设置切换把手，根据现场工作需要切换，这样便能保证设备在检修期间正常工作。

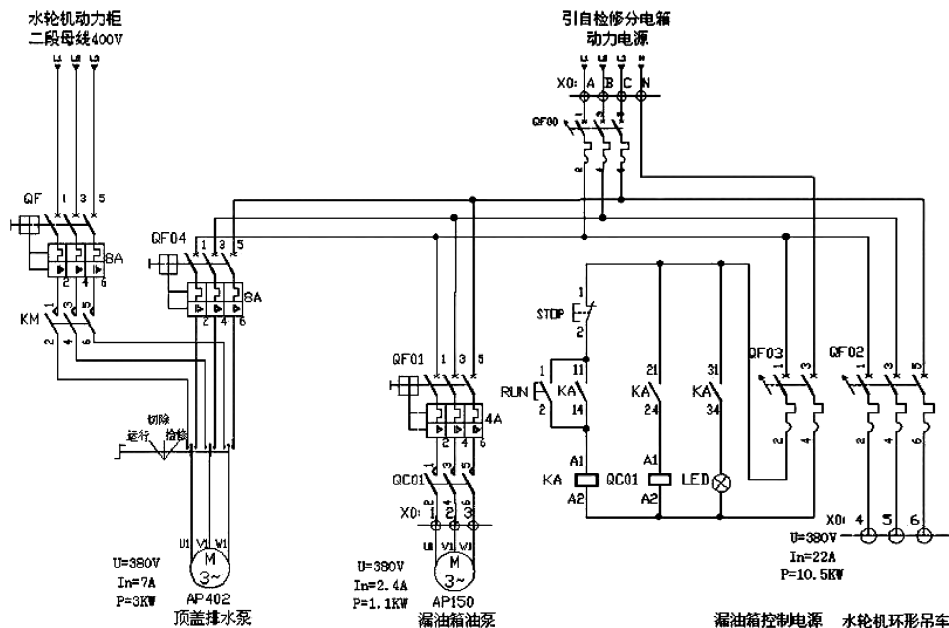


图 2-14 增加检修电源的接线示意图

2.17 机组顶盖支臂间排水连通孔尺寸需与排水泵流量匹配

问题描述：顶盖排水泵启动排水时，由于各隔间的排水通孔过小，顶盖内的积水不能通畅集中到顶盖排水泵进口隔间位置，使得顶盖排水泵在快速排完安装位置隔间的水后即停止，而待其他隔间的水缓慢集中到顶盖排水泵位置时，排水泵又再次启动，导致顶盖排水泵启动频繁，排水效果不佳。

优化建议：根据顶盖排水泵的流量大小设计顶盖内各排水连通孔大小，保证顶盖内积水能顺畅集中到顶盖排水泵位置，避免顶盖排水泵启动频繁。

2.18 机组各部位螺栓应采取防腐措施

问题描述：机组顶盖与座环连接螺栓，蜗壳进入门、锥管进入门、肘管进入门螺栓，顶盖组合面螺栓等所处的环境阴暗、潮湿，长时间运行后容易发生锈蚀，并会导致螺栓的机械性能变化，从而影响机组的安全稳定运行。

优化建议：机组各部位螺栓应设计尼龙保护套或涂刷防锈剂进行防腐处理，且此工作应该列入到设计要求里面，即在安装期间要求螺栓紧固后即刷上防锈剂，或对不常拆卸的螺栓进行刷漆防护处理，避免螺栓在长期潮湿环境下快速锈蚀，产生断裂或其他不可发生的事故。

2.19 机组平压管应设计成不锈钢材质

问题描述：目前机组在最初安装时均采用碳钢材质平压管，在机组运行一段时间以后，由于平压管内部的水流气蚀，平压管出现穿孔漏水情况，且此现象在运行几年内即出现，严重威胁机组的安全运行。

优化建议：采用不锈钢材质平压管，延长平压管使用时间和增强抗腐蚀性能。

2.20 水车室内的爬梯宜设计为平踏步并做防滑处理

问题描述：目前部分机组跨控制环的爬梯设计为圆钢管踏步结构，人员在上面行走容易出现滑跌情况，存在人员不安全风险。

优化建议：对所有原设计为圆形钢管踏步的爬梯进行优化，增设平面结构踏板，并采用防滑材料，踏板表面涂刷防滑涂料，加强摩擦系数，提高人员行走安全系数。

2.21 机组水导外循环油过滤器宜设计成双筒形式

问题描述：某些机组水导外循环油过滤器设计为单筒油过滤器，当过滤器堵塞时，降低水导循环通油量，可造成水导油位低及瓦温高现象。由于过滤器为单筒结构，无法在故障时投入备用，进行切换处理，使得机组运行风险增加，遇到过滤器堵塞必须进行停机处理。

优化建议：水导外循环油过滤器设计成双筒过滤器，一个作为主用，一个作为备用，这样便能在设备故障，过滤器堵塞时进行切换处理，无须停机，提高机组可靠性和安全性。

2.22 机组水导外循环油泵控制逻辑应考虑循环管路油流量

问题描述：在进行水轮机水导油泵的控制时，对水导油泵的控制主要采用油槽油位开关量作为控制信号，当水导油槽油位过低时，触发机组事故停机。在机组实际运行过程中，存在机组水导油泵切换过程中暂时性触发油位过低信号，也存在油位计故障，信号误发情况，这样便存在机组的事故停机风险。

优化建议：机组事故停机流程在设计时充分考虑各种可能性，增设流量监控，规避水导油槽油位过低的误信号停机风险，可考虑在水导外循环管路安装可以精确测量水导油流量的流量计（如超声波流量计），并让油流量参数参与主、备用泵启停与切换，机组事故停机等控制逻辑。

2.23 水导循环油泵联轴器应设计观察孔

问题描述：部分机型水导油泵联轴器无观察孔检修时无法直接检查联轴器缓冲垫状况，水导油泵运行状况对机组安全有着直接的影响，曾经有机组发生由于油泵联轴器缓冲垫老化而造成停机事件。

优化建议：根据联轴器护罩情况，更换带观察孔的护罩或直接在护罩上进行开孔，方便检查缓冲垫实际情况，及时发现异常并更换，确保水导循环油泵的正常运行。



图 2-15 增设联轴器观察孔示意图

2.24 水轮机水导不宜采用无轴领结构

问题描述：某电站水导存在有轴领结构、无轴领结构两种结构，无轴领水导油槽结构如图 2-16，其上部油槽含有上油箱及下油箱两部分，并且设置外油箱用来存油。水导外循环系统运行时油泵把油从外油箱吸至上部油槽，油泵停止运行时上部油槽油自流回外油箱。因此存在如下两个问题：

1. 由于水导油槽油位需要油泵来维持，在油泵发生故障后，油位迅速降低，需要立即停机以保护水导瓦不受损害；
2. 水导油循环系统未运行时，上部油槽无油，水导瓦暴露在空气中，水导油槽及水导瓦长时间暴露在空气中可能发生锈蚀。

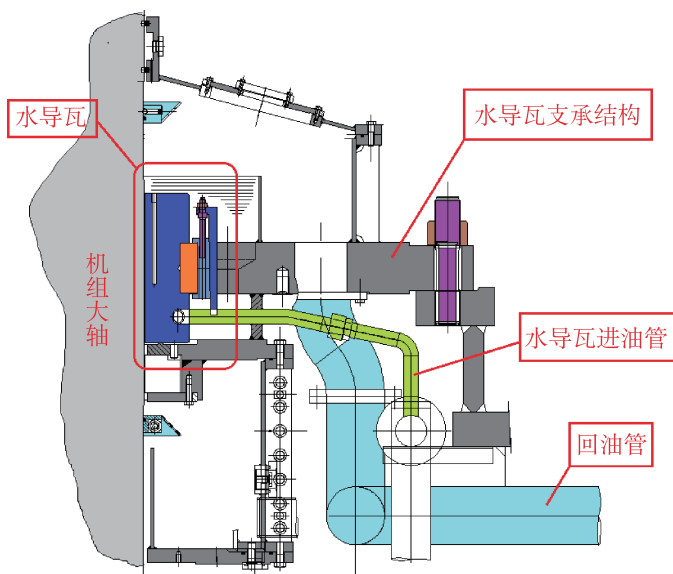


图 2-16 无轴领水导油槽结构

有轴领水导油槽结构如图 2-17，由于设置了轴领，其下部油槽用来存油，当油泵发生故障时水导油仍储存在油槽中，仅仅不能进行冷却，将提供相对较长的时间进行应对。水导外循环系统不运行时，油存于油槽中，水导瓦及轴承结构浸于油中，能有效防止水导锈蚀。

优化建议：通过对有轴领及无轴领结构水导油槽结构分析及实际应用，建议采用有轴领结构水导油槽。

2.25 油冷却器管路串并联结构应设计为可选择方式

问题描述：某机组水轮机导轴承采用 3 台油冷器，油循环管路和冷却水管路均

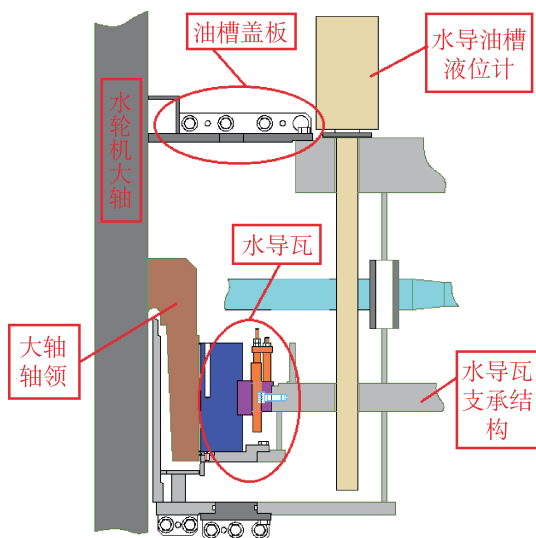


图 2-17 有轴领水导油槽结构

为并联结构，另一同类型机组水轮机导轴承亦为 3 台油冷器，油循环管路和冷却水管路均为串联结构，两者油冷器设计容量相同，水导冷却系统油、水管路尺寸、流量均相同。该机组水导轴瓦温偏高，最高达 62℃。

优化建议：结合对冷却器的冷却效率计算，串并连方式在进行管路设计时列入考虑，以便于在实际运行过程中对故障设备进行隔离以及提升冷却效果。参照同电站另一机组水轮机导轴承冷却器油路连接方式，串联冷却效果较并联方式更加合理。

2.26 水导油槽结构优化研究

问题描述：某机组下挡油环的结构是分 12 瓣，通过钢球和螺丝固定在主轴上，机组运行时甩环随主轴一起旋转。下挡油环的材料为铸铝合金，其内圆与大轴配合处设有 O 型密封圈，甩环的 12 个分瓣面之间涂有乐泰平面密封胶。当机组运行时，下挡油环在离心力的作用及受热的情况下，一方面是下挡油环与大轴之间间隙增大，使得 O 型密封圈的密封紧量减小，导致漏油，另一方面是下挡油环的刚性较差，分瓣面无法把合严密，出现间隙，使得密封胶失效导致漏油。

优化建议：在机组当前运行方式下，不改变水导主要尺寸和结构，为解决水导下挡油环漏油及水导油雾外溢问题，提出下面的方案：

1. 将原设计的铸铝合金下挡油环改为橡胶挡油环，按 $\Phi 4005\text{mm}$ 直径整体制作，制作后采用开一个口绕在轴上进行紧箍把合。
2. 橡胶挡油环外侧采用两瓣钢带将其箍紧在大轴上，紧固部分采用防松结构并

考虑离心力的影响。

3. 橡胶挡油环下端装有 12 瓣弧形托板，借用原轴上用于固定下挡油环的顶珠孔安装定位，用于橡胶挡油环的轴向支撑。12 瓣托板安装后形成一个整体圆环，把合面均设有防松装置。

4. 水导下油槽挡油筒上与大轴之间增设径向随动接触式密封油挡，用于防止下油槽产生的油雾向外溢出；在油挡下端装有 12 个可调整轴向支管架，调整座圈与轴的垂直度和同心度。

5. 为防止透平油在离心力的作用下，碰撞下油槽壁产生大量的油雾，在槽壁上设有缓冲吸油材料层，使具有一定速度的透平油经过缓冲吸油材料层后流向下端。

6. 为防止下油槽内产生正压，在槽壁上对称设有 2 个过滤式排空器，保证下油槽内部压力恒定。

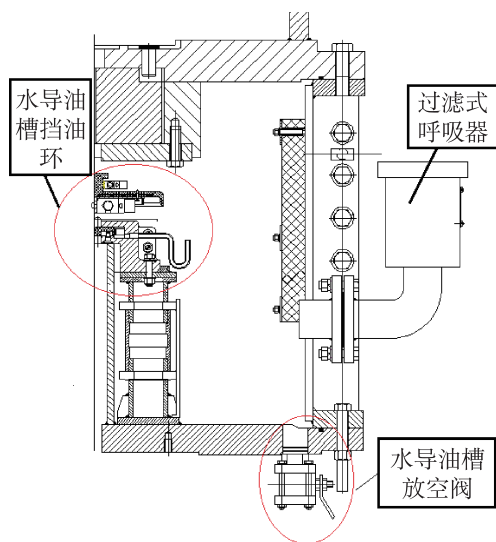


图 2-18 优化后的水导油槽结构

2.27 水导油槽管路布置应考虑便于日常维护检查

存在问题：机组水导油系统管路、漏油箱和水导供排油管主要集中布置在顶盖通道内，如图 2-19 所示。由于管路繁多导致顶盖内拥挤，人员很难在顶盖内圆周通过，对维护检修及操作工作带来不便。

优化建议：把漏油箱位置往活动导叶方向移动到合适位置，下面配置基座固定。水导供排油管沿基坑里衬布置，在供油管进外油箱附近加装球阀以便水导加油时操作。水导油泵出口后相关油管路往顶盖外围方向重新配管布置，保证顶盖通道流畅。

整体布置如图 2-20 所示：

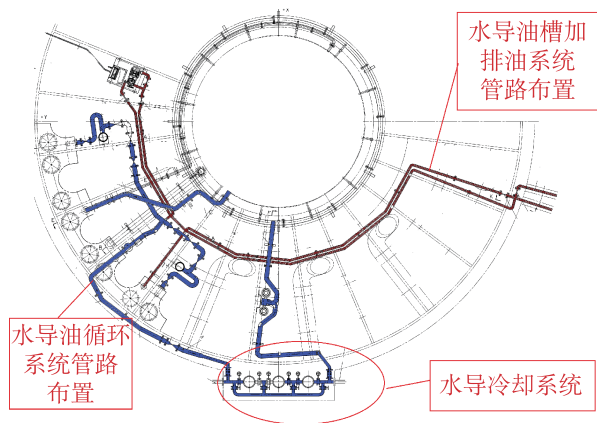
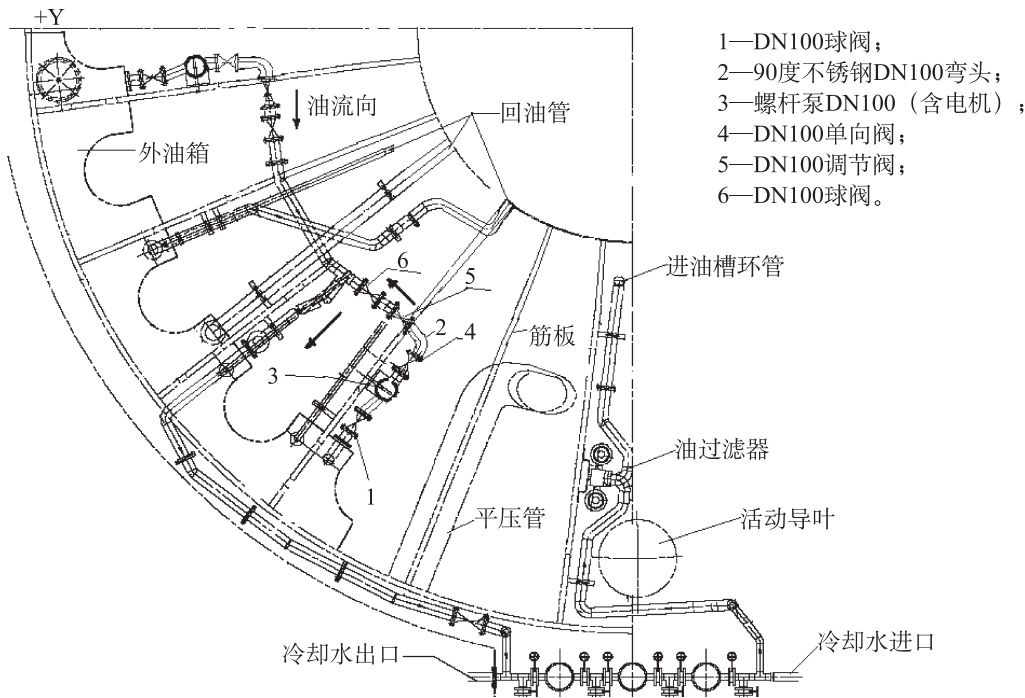


图2-19 原水导油管路布置图



注：在不影响顶盖通道和使用功能的情况下，管路的配弯、管道连接可根据现场具体情况调整布置。

图2-20 优化后水导油管路布置图

2.28 某机组水导油槽密封渗漏研究及优化

问题描述：某机组水导油槽由内挡油桶、底部连板、水导油槽三部分组成。其中，内挡油桶和水导油槽通过底部连板及内、外两圈压板连接成为一个整体。内挡

油桶与底部连板、水导油槽与底部连板的对接表面之间分别各有一圈 $\Phi 8$ 的 O 形圈作为油槽底部组合面间的密封，防止油槽底部漏油。

漏油原因分析：

1. 在现有结构形式下，相互连接的内挡油桶与底部连板、水导油槽与底部连板的连接是采用的对接方式。即将两圈压板用螺栓分别安装在内挡油桶与底部连板、水导油槽与底部连板的上表面，以达到将两部件连接成一个整体的目的（如图 2-21 所示）。此种连接方式螺栓压力的作用方向是垂直向下，平行于两部件组合面。而 O 形密封圈是安装在组合面之间的密封槽中，没有受到一个垂直作用于密封表面、压紧 O 形圈的压力。O 形圈仅仅是通过密封面之间的间隙的变化挤压变形，实现密封的作用。这种情况下，密封面圆周间隙值的大、小是否合适，是否均匀，直接影响密封圈受压、变形情况。圆周间隙不均匀，可造成密封圈圆周受力不均，导致密封圈圆周变形不一致，影响密封圈的密封效果；间隙值过大，可导致密封圈在密封槽内的变形不充分；间隙值过小，可引起密封圈在密封槽内过变形，缩短密封圈的使用寿命。

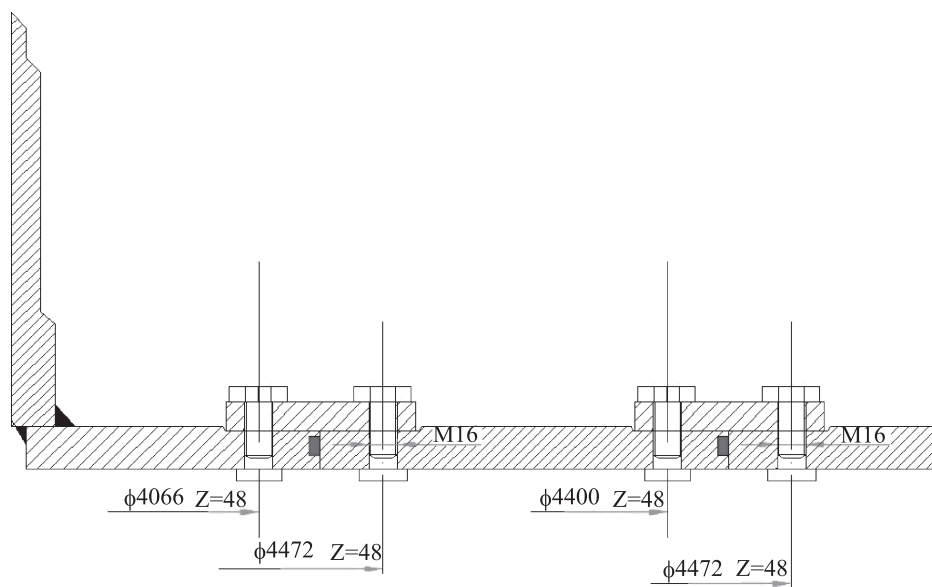


图 2-21 某水导油槽原结构图

2. 安装过程中，内挡油桶与底部连板、水导油槽与底部连板之间的同心度及水平度直接影响密封面的圆周间隙分布情况，影响密封圈的密封效果。

3. 密封槽内表面的加工精度（表面粗糙度）及尺寸精度（宽度、深度），直接影响密封圈的变形量及密封效果，密封槽内表面的表面粗糙度过大加速密封圈的磨损，缩短密封圈的使用寿命；密封槽的宽度、深度不均匀，可导致密封圈在密封槽内的变形不均匀，而产生漏油。

4. 由于相互连接的内挡油桶与底部连板、水导油槽与底部连板的连接是采用的对接方式，二者之间是通过压板连接，作用力分别作用在内挡油桶、底部连板、水

的对接缝中的 $\Phi 8$ 的 O 形密封圈仍然安装在接缝中。为了保险起见, 安装时在水导油槽底部的两条环缝中涂上乐泰胶。

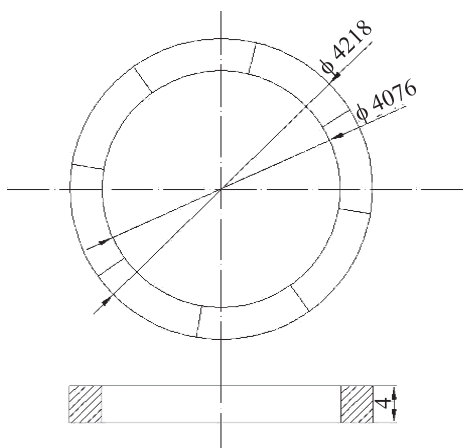


图 2-23 内侧压板图

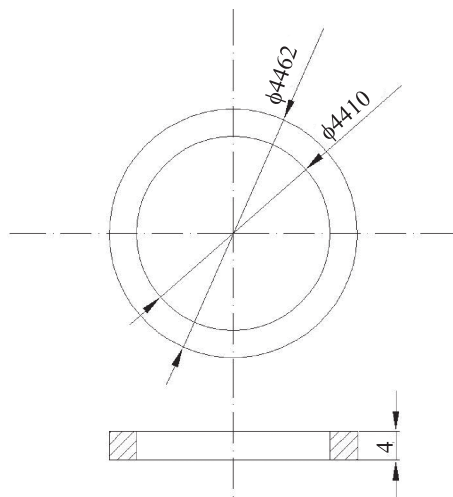


图 2-24 外侧压板图

2.29 水车室人行环道及设备表面作防滑处理

存在问题：在机组检修和运行过程中，接力器下部地面、水车室环行走道及顶盖表面都会一定程度地存在油和水，容易导致人员的滑跌摔倒。为了提高地面的摩擦系数减少工作场所滑跌事故，需对以上设备表面进行防滑处理。

优化建议：对水车室以上提及位置，适用效果较好的防滑涂料进行涂刷，增强表面防滑系数，确保人员行走安全。

2.30 机组主轴密封水箱应设计观察孔

问题描述：某机组主轴密封水箱没有安装观察孔，无法观察机组运行时水箱内清洁水的情况。

优化建议：在水箱盖板上增加一有机玻璃观察孔，方便运行维护人员进行观察。

2.31 主轴密封机械磨损指示装置应设计为刚性结构

问题描述：某机组主轴密封机械磨损量指示装置采用钢丝绳滑轮组传递显示其磨损量。由于钢丝绳长期浸泡在水中会有锈蚀情况，加上机组正常运行时，水箱内的水流力大，对水箱内的钢丝绳有一定的冲刷力，扩大测量误差、加快了钢丝绳的断裂。

优化建议：主轴密封磨损量指示装置应设计为轴杆传动。

2.32 主轴密封供水支管的设计应综合考虑材料与连接方式

问题描述：某机组主轴密封水箱内浮动环的清洁水主要由 12 根金属软管供给。机组正常运行时，由于水流力大，可能导致水箱内金属软管松动、漏水甚至脱落，直接影响机组的安全运行。

优化建议：机组主轴密封供水应设计成相对固定的不锈钢管，由于浮动环是轴向活动的，不能硬连接，所以在进水管的下端配置一小段金属软管。

2.33 主轴密封供水软管接头不宜采用卡套式接头

问题描述：主轴密封水管主要依靠卡套式接头与水管夹紧所产生的摩擦力进行连接，若安装时夹紧力太小，当机组运行时，顶盖内震动较大，加之浮动环在机组运行时上下移动，使部分主轴密封水管卡套式接头 2 脱落，导致主轴密封水不能全部进入密封腔内，主轴密封缺水同时导致管路大量漏水。

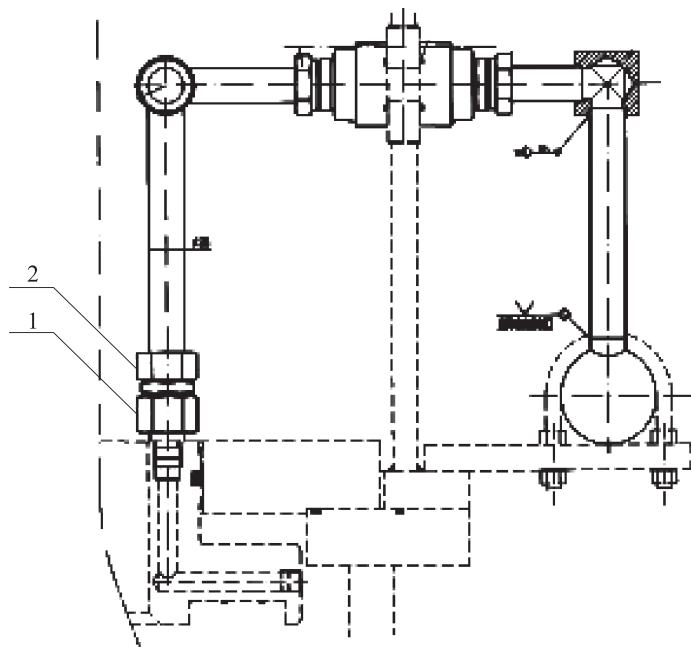


图 2-25 原主轴密封进水管图

优化建议：将原有的卡套式连接接头改为图 2-26 所示焊接式端直通管接头。

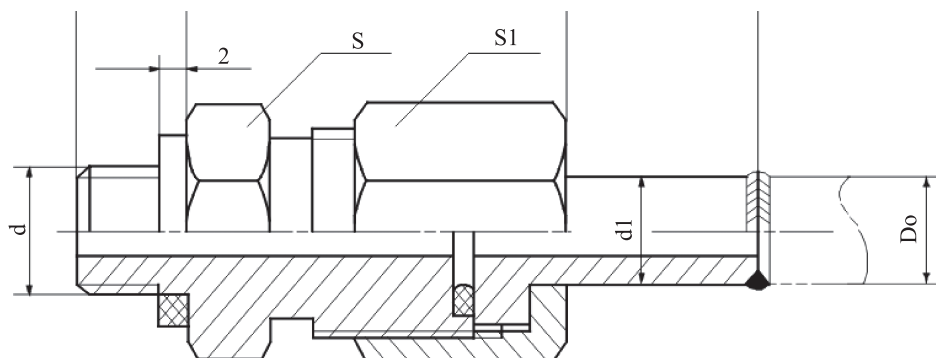


图 2-26 焊接式端直通管接头

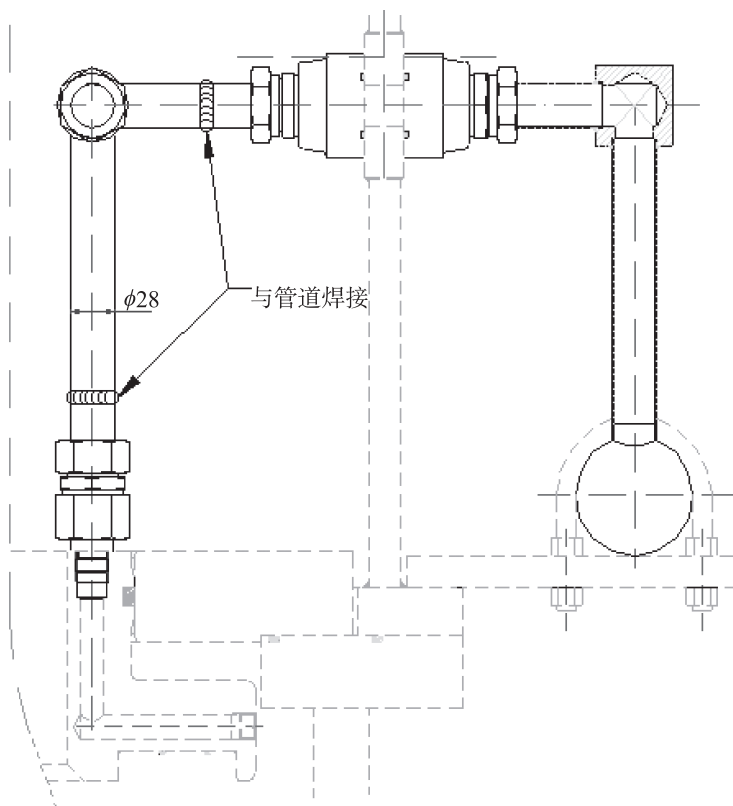


图 2-27 改造后安装示意图

2.34 主轴密封过滤器选型需综合考虑结构和排污方式

问题描述：目前主轴密封过滤器缺陷偏多主要存在过滤器轴封漏水，压差报警以及自动排污故障等缺陷，占主轴密封过滤器一半以上缺陷。在实际运行中，过滤

器滤芯经常出现生锈导致发卡滤筒现象，不能正常排污，导致过滤器进、出口压差超标、报警，影响主轴密封的正常供水。

优化建议：在进行主轴密封过滤器选型时需全面考虑过滤器的过流量，排污方式，清洗方式等，并考虑日后运行故障的优化等。

2.35 主轴密封供水管路上的逆止阀应选择带预紧压力结构

问题描述：目前主轴密封供水系统为了确保密封水的压力及流量，均在系统管路中设置了加压泵，加压泵出口设置逆止阀，防止水流逆流导致加压泵反转。在实际运行当中，由于逆止阀选型不合理，采用的是自由升降式逆止阀，关闭预紧力只靠阀盘自身重量，所以就出现了逆止阀关闭不严，加压泵在进出口有压力差的条件下出现正转，这主要是加压泵出口压力在管路损失后小于加压泵进口压力，导致了水流的发生。

优化建议：对加压泵出口逆止阀进行换型，选择带弹簧结构的升降式逆止阀，使其在正常运行中弹簧预紧力抵消加压泵前后压差所带来的水流影响，避免了加压泵长期低速运转给水泵带来的损害。

第 3 章 发电机机械设备维护技术研究

3.1 磁极极间连接拉紧螺杆固定块背部应加装绝缘堵板

问题描述：某大型水电站机组运行中，因转子回路故障造成发电机裂相保护和中性点横差保护动作，转子回路发生了三点接地，机组被迫停机。停机后检查，发现转子接地的直接原因是 12 号、60 号、72 号磁极极间连接拉紧螺杆固定块背部因吸附较多的灰尘与铁屑，造成磁极与磁轭间绝缘能力降低而放电，严重威胁机组安全稳定运行。

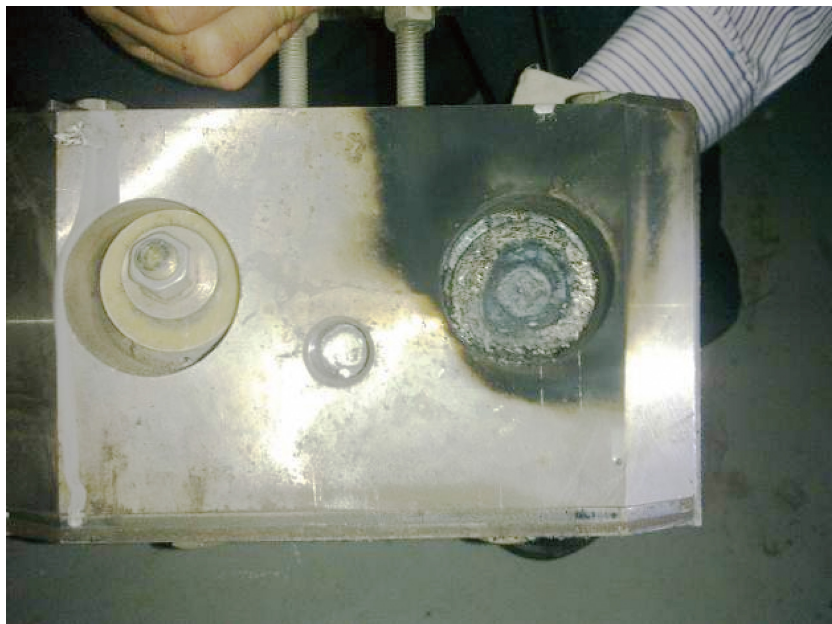


图 3-1 未加装绝缘堵板前出现的烧损情况



图3-2 固定块背部孔内加装绝缘堵板后的效果图

优化建议：为彻底解决此类问题，提高机组长期安全稳定运行的可靠性。将机组磁极极间连接拉紧螺杆处涂绝缘漆，且在固定块背部孔内加装绝缘堵板（复合型固化环氧树脂F级绝缘材料）。以便提高绝缘水平和有效防止粉尘及杂物落入磁极极间连接拉紧螺杆固定块背部孔内。

3.2 顶转子系统管路接头宜采用统一规格

问题描述：当机组在安装和检修期间，常常需要用油泵将压力油打入制动器顶转子；没有配备高压油减载装置的机组，当经历较长时间的停机之后，再次启动之前，亦需用油泵将压力油打入制动器顶转子。可见，水轮发电机顶转子是一项在运行维护中较常见的工作。顶转子油泵一般为可移动油泵泵站，某大型水电站共4种机型，各种机型制动器类型不一样，制动器顶转子接头不统一，造成不同机型需配不同类型的移动泵站和接头，增加了设备的投入成本和工作量。

优化建议：优化泵站管路连接，使泵站进出油管路符合不同类型的制动器的要求；同时，统一制动器顶转子接头类型，这样移动泵站可以满足不同类型机组的顶转子要求。

3.3 振动环境中管道定子冷却系统不宜采用管箍结构连接

问题描述：蒸发冷却系统每路回液管在经过上风洞地面时，为了安装时方便，使用特制的管箍形式限位接头，并由该限位接头对此管道连接进行密封。由于管箍式限位接头自身设计原因，其紧固螺栓只有两只，在机组风洞的振动环境下容易出现逐渐松动的问题；而其内部密封使用三元乙丙橡胶材质，又有使用寿命的局限，所以在蒸发冷却系统中使用这种接头有一定的不可靠性。某机组蒸发冷却系统曾出

现冷却介质泄漏问题，就是因为连接回液管的管箍式限位接头出现松动导致。

完善建议：在振动较大的环境中，应尽量避免使用管箍式限位接头对管道进行连接，采用法兰连接最为可靠。如果安装现场空间较小不能使用标准法兰时，可设计使用特殊形式的法兰进行管道连接。如 28F 蒸发冷却系统冷凝器回液管连接最后改造为矩形法兰连接，使用丁腈橡胶 O 形圈密封的形式。

3.4 定子上方的环形管道宜采用一点接地方式

问题描述：某机组蒸发冷却系统集气环管使用管箍式限位接头连接，而集气环管与冷凝器之间的法兰连接密封垫片绝缘性能不合格，导致在机组实际运行过程中集气环管多点接地，并在环管局部出现感应电流。感应电流在流经管箍式限位接头时，因为管箍外壳与环管之间并非紧密接触，故在管道与管箍外壳之间出现放电现象，使得管箍内部密封橡胶被烧毁。此机组集气环管一管箍周围流出黑色黏稠液体，打开管箍后发现密封橡胶部分被烧熔。

完善建议：因为机组运行时的电磁感应现象，定子上方的环型管道极易出现不可定量的感应电流。在对环形管道进行接地时应采用一点接地方式，并在接地点 180°位置将环形管道的导电性隔断并保证管道上其他位置的良好导电性，这样可以有效地解决环管中出现感应电流的问题，避免因为感应电流过大对机组设备造成伤害。

3.5 各部轴承油槽采取有效的防油雾措施

问题描述：机组高速运转时在离心力作用下，油槽中的油碰撞、机械损耗产生的热量膨胀，形成油雾分子从油槽的各个缝隙处溢出，冷却后形成细小油珠吸附在设备上，对机组的电气及机械设备形成污染。风洞内油雾还对发电机转子磁极、磁轭以及定子线棒造成污染，油雾与灰尘在定子铁芯通风沟处堆积，造成电机通风散热变差，严重影响发电机的散热效果。油雾和灰尘长期吸附在绝缘层上，对发电机线棒造成腐蚀，使其绝缘性能下降，加速老化，极易造成发电机线圈短路或击穿，给机组安全稳定运行带来潜在的危害，威胁发电机的安全运行。

优化建议：轴承油槽防油雾措施主要包括：1. 各部轴承油槽增加油雾吸收装置，吸收机组运行过程中轴承产生的油雾；2. 将油槽顶层盖板由间隙式密封更换为接触式密封。

3.6 机组各部轴承需设计油位测量孔

问题描述：在机组停机维护期间，需对机组各部轴承油位进行测量或进行油位

整定。油位计的显示由于各种原因会出现显示误差的存在，导致运行和维护人员无法准确判断油槽实际油位。因此，各部轴承需设油位测量孔。

优化建议：选择有利于测量机组油位的位置，在油槽上增设油位测量孔。

3.7 机组推导外循环冷却系统应设计备用油泵

问题描述：当推导外循环油泵或电机出现故障时，相对应的外循环冷却装置将被迫随之退出运行，直接影响推导轴承的冷却效果，导致推导油槽油温和瓦温不断升高，甚至引起烧瓦，从而直接影响机组安全稳定运行。因此，当外循环油泵或电机出现故障时，必须有备用油泵投入运行，以保证机组的安全稳定运行。

优化建议：在现有的推导外循环冷却装置的单台油泵基础上，通过三通在原油泵的进出口油管上再并联加装一套循环油泵及相关管路互为备用。在每组外循环油泵及电机的管路上分别设置止回阀和截止阀。

3.8 机组推导冷却系统需设计油流量计

问题描述：机组运行时，需掌握冷却器的实际油流量，一方面与冷却器的设计油流量相校核，另一方面可根据油流量大小判断冷却器内油循环管路是否堵塞。同时，掌握冷却器的实际油流量，也为冷却器的改造换型提供实际有效的理论数据。

优化建议：在冷却器出油管路上选取适合位置开孔，开孔位置应位于便于流量计安装及维护的管道上且应避开管道拐弯和交汇处。

3.9 自泵油循环冷却系统的导瓦出油管与环管连接管路不宜采用橡胶软管

问题描述：采用导瓦自泵油循环冷却形式的机组，自泵瓦泵油管路出口与环管采用橡胶软管连接管箍紧固的连接形式。某大型水电站的机组运行中，自导瓦泵油管路出口与环管连接形成密闭的循环通路，使管路内形成一定的油压，将热油送入冷却器冷却后，在相对低压的出油口进入油槽，达到循环冷却的目的。检修时发现，泵油管路出口与环管进口连接的橡胶软管因为材质原因而无法承受管路中的压力，导致软管破裂，使油冷器油路形成短路现象，减少了热油的油流量，导致油槽油温较高，瓦温相应升高，直接影响机组的安全可靠运行。

优化建议：将自泵瓦泵油管路出口与环管连接的橡胶软管改为钢丝波纹软管，与自泵瓦泵油管连接端改为焊接形式，另一端采用管箍紧固连接方式。

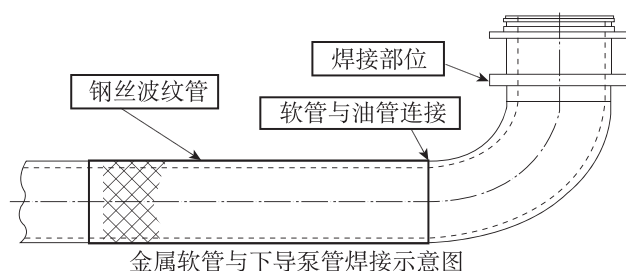


图 3-3 下导自泵瓦泵油管路钢丝波纹管的连接方式

3.10 高压油减载系统需设计压力传感器

问题描述：机组在开、停机过程中，需启动高压油减载系统，高压油减载系统压力大小直接关系到机组能否正常开停机。机械压力表只能现场观察，不能实时监测及查询每次开停机高压油压力数据，对高压油减载系统的故障诊断带来不便。

优化建议：根据高压油系统管路的布置情况，在高压油减载系统油泵出口总管上增加压力模拟传感器，并接入监控系统。

3.11 发电机顶转子系统需设计回油箱

问题描述：发电机顶转子工作完成、移动油泵撤走之后，管路及缸体仍有少量残油，一方面残油的存在可能导致风闸动作不灵活，影响机组正常投运；另一方面，残油从制动柜顶转子油泵接口渗出，影响机组的整洁美观，见图 3-4。

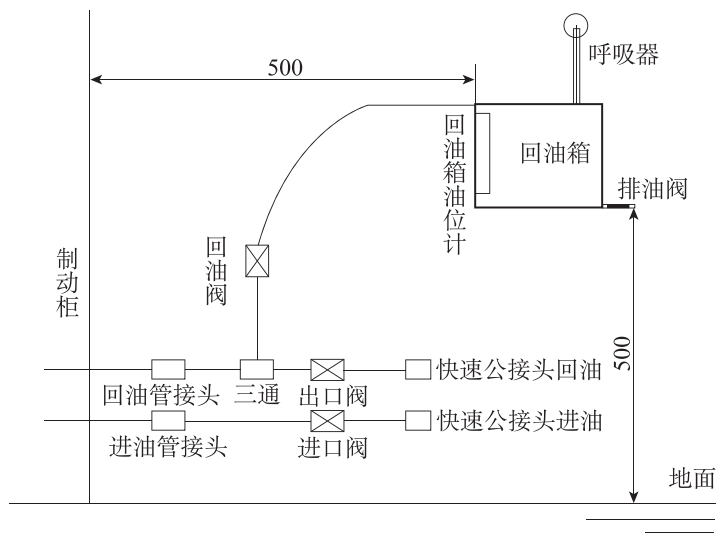


图 3-4 增设顶转子回油箱示意图

优化建议：在顶转子系统回油管上加装三通，引一回油管与回油箱相连，回油管上加装回油阀。

3.12 机组风洞内部冷却水管路应设置防结露措施

问题描述：机组风洞内冷却水管在夏季气温较高的时候，由于风洞内温度较高，而冷却水管内的温度较低，内外的温度差易造成管道外部产生结露；尤其是部分冷却水管布置在转子上方，机组运行时，结露水对机组安全稳定运行带来极大的隐患。

优化建议：风洞内部冷却水管应采取防结露措施，主要包括：1. 根据风洞内管路布置情况，对管路进行保温层包扎，可有效解决冷却水管结露现象；2. 在风洞内冷却水管上刷防结露涂料，有效吸收凝结的水分并在外部温度升高后逐步蒸发，可以有效地防止结露现象的出现。

3.13 机组推导冷却系统需设计油流量计

问题描述：机组运行时，需掌握冷却器的实际油流量，一方面与冷却器的设计油流量相校核，另一方面可根据油流量大小判断冷却器内油循环管路是否堵塞。同时，掌握冷却器的实际油流量，也为冷却器的改造换型提供实际有效的理论数据。

优化建议：在冷却器出油管路上选取适合位置开孔，开孔位置应位于便于流量计安装及维护的管道上且应避开管道拐弯和交汇处。

3.14 发电机空气冷却器进出水管设计成橡胶伸缩节

问题描述：机组运行时，定子铁芯和定子机座受热产生一定量的膨胀，膨胀量随机组负荷的增加而增大。通常情况下，空冷器通过螺栓固定在定子机座上，因此空冷器随定子受热膨胀产生一定的径向位移量。如空冷器与进出水管路全部为刚性连接，空冷器的径向位移量使与其相连接的管道产生变形，降低了管道的使用寿命，因此在空冷器进出水管段应装有一段橡胶软管作为膨胀量的缓冲。

作为空冷器膨胀量的缓冲，橡胶软管通过管箍、螺栓与不锈钢管路把合在一起。由于橡胶软管本身具有较大的弹性形变，空冷器运行时，冷却水压力对橡胶软管产生一个张力；当空冷器停止运行后，冷却水沿出水管路自流排出，在空冷器进出水管中产生负压。在反复的张力和压力作用下，严重影响橡胶软管的使用寿命，并容易引起橡胶软管接头松动导致漏水，威胁机组的安全稳定运行。

优化建议：将橡胶软管更换为橡胶伸缩节，橡胶伸缩节具有以下优点：1. 橡胶伸缩节两端自带法兰，法兰与管路上蝶阀通过螺栓连接，大大提高了伸缩节的连接

强度；2. 橡胶伸缩节安装时可产生横向、轴向、角向位移，不受管道不通心，法兰不平行的限制；3. 橡胶伸缩节工作时可降低结构传递噪声，吸振能力强。

3.15 推导外循环冷却器差压计管路接头不宜采用卡箍式

问题描述：某机组共计6台，推导外循环冷却器的差压计管路，采用 $\phi 10\text{mm}$ 的不锈钢管路，管路接头部分采用卡套式密封结构。目前设备上安装有两种材料的卡套，一种为金属密封卡套，另一种为塑料卡套。卡套式密封不仅对管子的圆度、加工精度要求较高，同时对卡套的材质和形式也有严格的要求。卡套式密封结构，如若出现密封管路不圆，卡套损坏，就会在机组振动及管路内部油流的作用下，发生脱落，导致油泄漏。特别是塑料式卡套密封，在长时间的机组运行后，塑料卡套容易出现变形、变硬，并且失去补偿性，最终导致管接头部分脱落。

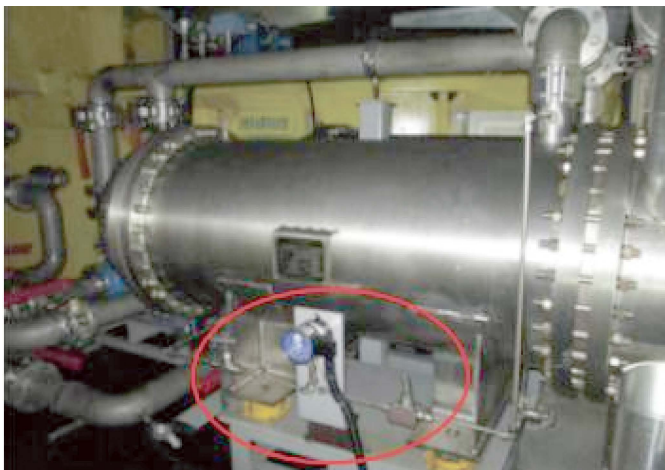
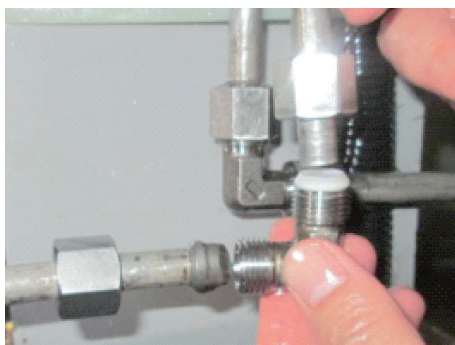
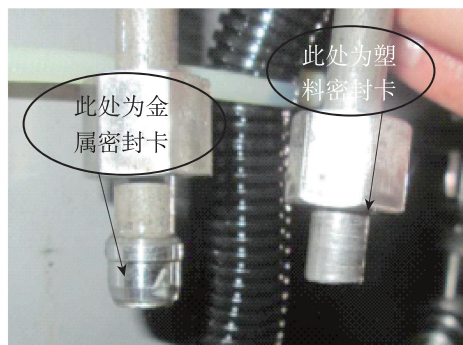


图3-5 外循环冷却器差压计安装位置



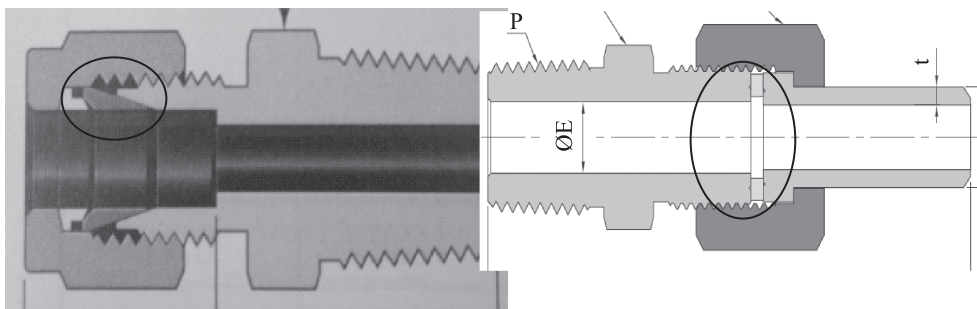
(a) 差压计管路接头



(b) 金属卡套

图3-6 卡套式接头结构

优化建议：卡套式密封因为对管子的圆度、加工精度要求较高，卡套式密封渗漏情况时有发生。为避免类似情况，可对推导外循环差压计管路连接的卡套进行换型，将目前的卡套式锥面密封形式结构，改造成结构简单、维护方便的端面密封式结构。



(a) 改造前卡套式密封接头结构

(b) 改造后端面密封式接头结构

图3-7 优化改进接头前后对比图

3.16 机组地面管路应考虑防踩踏措施

问题描述：机组地面由于布置制动系统及外循环冷却系统等辅助设备，各设备管路横跨通道上，造成人员行走不便及损坏管路上的保温层，更有可能由于人员行走中的不慎踩踏造成管路松动，形成隐患。



图3-8 未设计跨梯时管路布置图

优化建议：在横跨地面上的管路加装踏步，踏步的设计要求根据现场实际情况而定，设计原则为便于人员通行及对管路保温层进行防护。

3.17 应设计从机组上架盖板进入转子上表面的爬梯

问题描述：部分机组的上转子爬梯设计在定子机座外围，上转子需要跨过机组汇流环，对机组汇流环存在踩踏风险。

优化建议：应设计转子上人梯，直接从上机架盖板进入，下端设置在转子上表面，这样需要进入转子上表面时，可以避免定子汇流环的电气设备，确保了人员和设备的安全。同时对爬梯应设置围笼，这样增加人员上下的安全防护。



图 3-9 现有的梯子形式

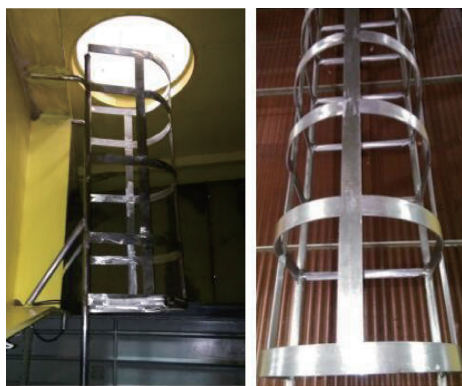


图 3-10 加装护笼笼后的梯子

3.18 冷却水管路宜采取有效防结露措施

问题描述：机组冷却器冷却水管，在夏季温差加大时，容易在管路表面形成凝露，威胁基坑内以及集电环内的电气设备绝缘和运行安全。

优化建议：结合不同的部位管路，采取有效的防结露措施，可以采用保温层或者涂刷防结露涂料等措施，有效避免结露情况出现。

未经中国三峡出版传媒有限公司的书面许可，任何媒体及个人不得转载、摘编该节选内容。违者将被依法追究其侵权责任。

如有需要请购买原版书。



三峡小微



中国三峡出版传媒



中国三峡出版社