

ICS 27.140
K 55



中华人民共和国国家标准

GB/T 29403—2012

反击式水轮机泥沙磨损技术导则

Technique guide for dealing with sand abrasive erosion
in reaction hydraulic turbine

2012-12-31 发布

2013-06-01 实施



中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局
中国国家标准化管理委员会 发布



中国水利水电出版社

1000-0000-0000

中国水利水电出版社

1000-0000-0000

1000-0000-0000

1000-0000-0000

<https://www.slzjxx.cn/>
水利造价信息网

1000-0000-0000

1000-0000-0000

中国水利水电出版社
地址：北京市西城区三里河大街27号
邮编：100044
电话：010-68380066
网址：http://www.slzjxx.cn/

目 次

前言	III
引言	IV
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	1
4 总则	4
5 过机泥沙分析及水电站防排沙措施	4
6 水轮机选型与设计	5
7 水轮机材料选择与制造	6
8 水轮机安装	7
9 水轮机运行与检修	7
10 水轮机泥沙磨损的保证值	8
附录 A (资料性附录) 磨损试验装置与试验方法	9
附录 B (资料性附录) 水轮机常用材料与防护材料的应用情况	15
附录 C (资料性附录) 水轮机磨损的观测	17

http://www.slzjxx.cn
水利造价信息网

前 言

本标准按照 GB/T 1.1—2009 给出的规则起草。

本标准由中华人民共和国水利部提出。

本标准由水利部水利水电规划设计总院归口。

本标准负责起草单位：中国水利水电科学研究院。

本标准参加起草单位：中国长江三峡集团公司、哈尔滨大电机研究所、东方电机有限公司、中水北方勘测设计研究有限责任公司。

本标准主要起草人：陆力、吴培豪、余江成、吴剑、徐洪泉、戴江、马素萍、石清华、刘洁、吴喜东、顾四行、刘娟、窦以松。

<https://www.slzjxx.cn/>
水利造价信息网

引 言

我国许多河流的泥沙含量较高,水轮机泥沙磨损问题十分突出。为了有效地减轻泥沙对水轮机的危害,保障水电站经济与安全运行,应在水电站设计和水轮机选型、设计、制造、安装、运行、维护与检修等各个环节考虑磨损问题并采取相应措施,有必要制定本标准。

我国开展水轮机泥沙磨损的研究已有 50 多年的历史,特别是近 30 年来有关科研、设计、制造、运行及检修等单位,对水轮机泥沙磨损机理、两相流理论、机型选择、抗磨措施、运行维护、试验技术等各个方面,进行了大量的试验研究工作与实践,获得了丰富的研究成果与实践经验,为本标准的编制打下了良好的基础。



反击式水轮机泥沙磨损技术导则

1 范围

本标准规定了反击式水轮机的选型、设计、制造、安装、运行、维护和检修中涉及泥沙磨损的技术要求。

本标准适用于装设反击式水轮机的水电站。

注：对于水中含有腐蚀质或酸碱度较大等水质条件的水轮机防护与注意事项需另行考虑。

2 规范性引用文件

下列文件对于本文件的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件，仅注日期的版本适用于本文件。凡是不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB/T 2900.45 电工术语 水电站水力机械设备

GB/T 8564 水轮发电机组安装技术规范

GB/T 10969 水轮机、蓄能泵和水泵水轮机通流部件技术条件

GB/T 15468 水轮机基本技术条件

GB/T 15469.1 水轮机、蓄能泵和水泵水轮机空蚀评定 第1部分：反击式水轮机的空蚀评定

SL 142 水轮机模型浑水验收试验规程（附条文说明）

DL/T 838—2003 发电企业设备检修导则

IEC 60193 水轮机、蓄能泵、水泵水轮机模型验收试验规程（Hydraulic turbines, storage pumps and pump-turbines—Model acceptance tests）

3 术语和定义

GB/T 2900.45、GB/T 15468 和 GB/T 15469.1 界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

3.1

反击式水轮机 reaction hydraulic turbine

通过转轮叶片与水流的相互作用将水流的势能与动能转换成机械能输出的水轮机。

注：反击式水轮机类型主要有混流式水轮机、轴流式水轮机、斜流式水轮机和贯流式水轮机等。

3.2

空化 cavitation

在流道中的水流局部压力下降到临界压力（一般接近汽化压力）时，水中气核发展成长为气泡，气泡的积聚、流动、分裂和溃灭的过程的总称。

3.3

吸出高度 static suction head

H_s

水轮机规定的空化基准面与尾水位的高程差。

注：吸出高度单位用 m 表示。

3.4

空化系数 cavitation coefficient

σ

表征水轮机流道某特定点的空化条件和性能的无量纲系数。

3.5

电站空化系数 plant cavitation coefficient

σ_p

相应于电站的某个下游水位时的空化系数。由下式计算：

$$\sigma_p = (H_b - H_v - H_s) / H$$

式中：

H_b —— 大气压力水头；

H_v —— 汽化压力水头；

H_s —— 吸出高度；

H —— 工作水头。

3.6

初生空化系数 incipient cavitation coefficient

σ_i

在水轮机转轮叶片表面开始发生空泡时的空化系数。

3.7

空蚀 cavitation erosion

空化形成的空泡溃灭时打击流道表面所造成的材料破坏和流失。

3.8

泥沙磨损 sand abrasion

因水流携带泥沙引起的对流道表面所造成的材料破坏和流失。

3.9

磨蚀 combined erosion by sand and cavitation

磨损与空化(空蚀)联合作用对流道表面所造成的材料破坏和流失。

3.10

腐蚀 corrosion

因水中含有某种元素对流道表面所造成的材料破坏。在水轮机中某些特定部位因电位(极)产生的电化学腐蚀,也可归于此类。

3.11

普遍磨损 surface abrasion

外貌类似于波纹、鱼鳞状相对较均匀的大面积破坏。

3.12

局部磨损 local abrasion

流道表面出现局部的沟槽、突体与缺陷等的破坏形态。

注：通常产生在水流急剧改变,发生冲击、汇流或脱流等处,如叶片头部、间隙、弯道、表面不平整以及材质缺陷等处。

3.13

磨损量 amount of abrasion

水流携带泥沙对流道表面所造成的材料流失量。

注：磨损量可用磨损深度 ΔH 、磨损面积 A 、质量损失 G 、体积损失 V 等表示。

3.14

含沙量 sand content**S**

单位水体体积中所含泥沙颗粒的质量。

注：含沙量单位用 kg/m^3 表示。

3.15

过机含沙量 sand content passing through turbine

通过水轮机单位水体体积中所携带的泥沙质量。

3.16

悬移质 suspended load

悬浮于水中随水流移动的泥沙。

3.17

磨损率 abrasion rate

单位时间内的磨损量。

3.18

单位磨损率 unit abrasion rate设定含沙量为 $1 \text{ kg}/\text{m}^3$ 时的磨损率。

3.19

粒径 grain size**d**

泥沙颗粒的大小。

注：粒径单位用 mm 表示。

3.20

中值粒径 median grain size **d_{50}**

在全部沙样中，小于和大于此粒径的泥沙重量各为 50%。

注：中值粒径单位用 mm 表示。

3.21

平均粒径 mean grain size **d_{pi}**

将一组泥沙按粒径大小分成若干组，各粒径组的粒径重量百分比的加权平均值。

平均粒径由下式计算：

$$d_{pi} = \sum_{i=1}^n \Delta p_i d_i / \sum_{i=1}^n \Delta p_i$$

$$d_i = (d_{\max} + d_{\min}) / 2$$

$$\text{或 } d_i = (d_{\max} + d_{\min} + \sqrt{d_{\max} \times d_{\min}}) / 3$$

式中：

 d_i —— 某一粒径组的粒径； Δp_i —— 某一粒径组泥沙在全部沙样中所占重量百分比； $d_{\max}$ 、 $d_{\min}$ —— 某一粒径组泥沙上限与下限粒径值。

注：平均粒径单位用 mm 表示。

3.22

水轮机大修 major overhaul of hydraulic turbine

为保持、恢复或提高设备性能,对水轮发电机组进行整体的或针对机组存在问题的部分设备进行解体的检查和修理。

注:相当于 DL/T 838—2003 中规定的 A 级或 B 级检修。

3.23

水轮机大修周期 major overhaul life of hydraulic turbine

从机组上一次大修后投运时至下一次大修开始时的时间间隔。

3.24

磨损保证期 period of abrasion guarantee

技术协议所规定的评价水轮机泥沙磨损程度的运行时间。

4 总则

- 4.1 为了减轻水轮机的磨损而采取的措施,应根据各个电站的具体情况与要求进行技术经济论证。
- 4.2 当对水轮机产品的抗磨性能、结构、运行等方面有其他特殊要求时,可在有关技术文件中规定。
- 4.3 积极采用有利于减轻泥沙磨损的新技术、新材料和新工艺。

5 过机泥沙分析及水电站防排沙措施

5.1 过机泥沙及水轮机磨损的预测分析

5.1.1 在水电站规划设计中,为预测泥沙对水轮机的磨损程度,应开展如下工作:

- a) 收集河流历年的水文、泥沙资料,并进行泥沙特性(泥沙粒径、泥沙矿物成分及含量、泥沙颗粒形貌等)分析;泥沙特性的分析结果应分别按汛期与非汛期给出,其中矿物成分及含量应按不同粒径组给出;
- b) 对大型水轮机的电站,当已有的泥沙资料不够全面,应在汛期在拟建水电站坝址处或其上下游的附近(区间内应无含沙量较大的支流汇入)直接从河水中取水样(悬移质),对汛期水流含沙量进行预测分析;
- c) 应对水电站建成后的河流泥沙变化以及过机泥沙的情况进行预测与分析,包括泥沙粒径、泥沙矿物成分与含量等的变化。

5.1.2 可采用模拟试验的方式对拟建水电站水轮机的磨损程度进行预测与分析。对大型水轮机,在选择试验方法时,试验条件宜与水轮机的磨损条件相近。试验用沙宜采用拟建水电站处河流的泥沙,试件宜采用水轮机拟用的材料。有关试验装置与试验方法可参考附录 A。

5.1.3 对拟建水电站的水轮机进行磨损预测分析时,可以借鉴该水电站所在流域及周边流域内已建水电站水轮机运行的磨损资料和经验,也可以借鉴其他河流同类型或相近水轮机运行的磨损资料和经验,对拟建电站水轮机可能遭受的泥沙磨损程度做出较明确的定性判断,例如可将磨损程度定性为轻微、中等和严重,并据此采取恰当而经济合理的抗磨措施。

5.2 水电站的防排沙措施

5.2.1 在水电站的水工设计中,可根据河流泥沙、河流地势与枢纽布置等情况,采取以下措施减少泥沙进入引水系统:

- a) 在规划范围内选择较大的水库库容;

- b) 修建沉沙池；
 - c) 对河流上游山区沙砾众多的径流式水电站，修建沉砾池；
 - d) 枢纽布置中机组段取水口的位置与底槛高程等的设计应有利于减少泥沙、特别要防止推移质和颗粒较粗的泥沙进入引水系统；
 - e) 可利用河流弯道环流作用，凹岸取水，减少粗泥沙或砾卵石推移质进入引水口。
- 5.2.2 在进水口前以及引水系统中宜设置拦沙、排沙和冲沙等设施。冲排沙设施位置不宜离进水口过远。河床式水电站冲沙底孔宜直接布置在机组进水口下方或侧旁，并有足够的深度，在进水口前形成漏斗状喇叭口。有多台机组多个进水口的电站，可在每个进水口下设置一个排沙底孔。
- 5.2.3 水力测量管路的布置，其走向应平顺以避免引起泥沙淤堵等，并宜设置可冲淤堵的水源或气源。

6 水轮机选型与设计

6.1 水轮机选型

- 6.1.1 水轮机型式的选择应根据水电站的运行水头范围、运行特点和过机泥沙特性，提出可供选择的水轮机机型方案。当水电站的水头段有两种及以上机型可以选择时，应从经济指标、设计制造经验、运行可靠性、抗泥沙磨损特性和维护检修等方面，经技术经济比较后选定。
- 6.1.2 在选定一种机型或转轮型号时，应对采用不同参数（容量、直径、转速等）的方案与磨损的关系进行比较与论证。有磨损的水轮机不宜追求高参数（效率、功率、比转速等），应根据泥沙条件与运行要求选择合适的参数。
- 6.1.3 水轮机的吸出高度应较在清水条件下运行的水轮机有更大的安全裕度。
- 6.1.4 水轮机台数应结合水轮机大修周期与电力系统对水轮机运行方式的要求等进行选择。
- 6.1.5 高水头混流式水轮机宜设置进水阀或圆筒阀。
- 6.1.6 对于预期磨损严重的水电站，设计时应根据水电站和水轮机的特点采用下列措施：
- a) 转轮的拆卸方式可考虑采用中拆或下拆方案，即不拆发电机，直接将转轮从水轮机室或尾水管位置处拆出；
 - b) 顶盖宜考虑冲淤设施并设置备用的排水泵。

6.2 水轮机水力设计

- 6.2.1 水轮机流道的设计应符合下列要求：
- a) 应采用计算流体动力学(CFD)方法进行设计计算。水轮机通流部件应符合 GB/T 10969 的要求，并宜通过模型试验对流道中的流态进行检验。模型试验应符合 IEC 60193 的要求。
 - b) 在水轮机规定的运行范围内，水轮机流道内应避免产生旋涡、脱流等流态。
 - c) 流道内的水流速度分布应均匀，避免出现局部过高的流速，特别对汛期运行工况。
 - d) 应避免流道有急剧的变化，叶片的曲率变化宜较小。
 - e) 流道内的流速不宜过高。混流式水轮机转轮宜选择较小的出口直径，降低转轮出口的圆周速度，转轮叶片出水边的相对流速不宜大于 40 m/s。对于预期磨损严重的水轮机可适当降低转轮叶片出水边的流速。
- 6.2.2 在水轮机规定的运行（特别在汛期）工况范围内，应保证水轮机不发生叶型空化和各种局部空化等。电站空化系数应大于初生空化系数，以避免发生空蚀与磨损的联合作用而加速水轮机破坏。
- 6.2.3 对于预计磨损严重的大型水轮机，除按通常的办法进行清水模型试验检验外，宜采用两相流计算与浑水模型试验等方法对浑水条件下的流动状况进行检验。浑水模型试验可按照 SL 142 的要求进行。在浑水模型试验中，除检验浑水条件下水轮机的水力性能外，还可用油漆法、易损涂层等方法检验水流流态、易磨损部位与相对磨损强度等。

6.2.4 高水头混流式水轮机的导叶高度与导叶分布圆直径宜适当增大,降低导叶区的流速及改善转轮前的流态。导叶叶型应选择有利于减小两侧压差的形式,减轻导叶端面与抗磨板间的磨损。导叶的轴颈不宜过粗或局部凸出,并应设计成与来流呈流线型结构,以避免局部流态急剧变化或脱流,产生局部磨损。

6.3 水轮机结构设计

6.3.1 水轮机流道设计应符合下列要求:

- a) 应避免流道内特别是在流速较高的部位,出现各种接缝、凸台、台阶等不平整现象。
- b) 混流式水轮机的导叶限位块宜设置在顶盖上。
- c) 轴流式水轮机的叶片宜取消吊装孔,改用与主轴、轴承、支撑盖整体起吊的安装方式。
- d) 尾水管内表面应避免出现吊钩等物体。进入门与管壁的连接应平整。应避免螺孔、螺栓裸露于流道表面。
- e) 在易磨损部位不宜出现过度的焊缝。焊缝应选择有良好耐磨蚀的焊接材料焊接,焊接后应打磨平整,保证焊缝的磨损不引起部件的破坏与脱落。

6.3.2 易磨损部件的结构强度设计应有足够的裕度,保证在一个大修周期内不因磨损而导致停机检修或部件更换。

6.3.3 易磨损部件的结构应易于装拆,并具有良好的互换性。易损部件应有足够的备件。

6.3.4 对各种接触式主轴密封,宜选择清洁水源。主轴密封的结构应保证能够快速更换。

6.3.5 在不影响其他性能的条件下,转轮叶片出水边与抗磨板的厚度应取较大值,保证在一个大修周期内不致磨穿。

6.3.6 水轮机、特别是高水头混流式水轮机其顶盖与底环应有足够的刚度,避免水轮机充水后因水压作用导致变形,造成导叶端面间隙的增大。顶盖内腔的设计应避免采用易于造成泥沙淤积的结构。水轮机顶盖与底环应设有可更换的抗磨板,宜采用塞焊不锈钢板或带板焊不锈钢,其表面应平整,不宜采用螺钉联接,拼缝应严密平整。

6.3.7 止漏环的结构设计应便于拆卸与更换。止漏环的间隙宜取较小值,对于直缝式与台阶式止漏环,间隙应有足够的长度,防止进出口等遭到磨损后导致间隙过早扩大与失效。对于中比速的中小型水轮机下止漏环推荐采用压盖式结构。密封梳齿根部厚度不宜过薄,头部尖角应适当修圆。

6.3.8 大中型转桨式水轮机叶片背面外缘宜设置裙边,减轻间隙空化引起的叶片背面外缘区和转轮室的磨损。裙边的尺寸与形式宜通过模型试验或有关经验来确定。

6.3.9 导叶立面宜采用硬止水方式,导叶端面不宜采用弹性止水密封结构。导叶端面间隙宜取较小值。导叶轴径密封应采用有利于阻止泥沙进入的密封结构。

7 水轮机材料选择与制造

7.1 水轮机材料选择

7.1.1 水轮机过流部件的材料(简称母材)应采用抗磨损材料制作,一般应采用抗磨损性能较好的不锈钢,母材表面应有较高的硬度。对预期磨损严重部件或部位还可采用表面防护材料保护,防护材料应根据部件或部位的特点与磨损强度加以选择。在选择母材与防护材料时,还应考虑磨损后在现场进行修复的可能性。有关水轮机常用抗磨损材料与防护材料等使用情况参见附录B。

7.1.2 对于中低比速水轮机,导叶端面、顶盖和底环抗磨板的材料应采用具有优良抗磨性的材料或涂层材料。

7.1.3 在选用新材料或新工艺时,宜先在试验室或现场进行试验检验。在试验室试验时,可参照5.1.2的规定。

7.2 水轮机加工制造

- 7.2.1 对于水轮机过流部件所用的材料,在加工前应采用无损检测方法进行检查,并对缺陷进行修复。
- 7.2.2 水轮机转轮叶片型线宜采用数控加工。
- 7.2.3 水轮机过流部件的表面型线应有良好的光洁度。易磨损部位的表面粗糙度不应大于 $Ra1.6$;其他磨损部位不应大于 $Ra3.2$ 。
- 7.2.4 轴流式水轮机转轮室与叶片外缘间的间隙(双边之和)不应大于转轮名义直径 D_1 的 $0.1\% \sim 0.2\%$,大中型水轮机转轮的间隙应小于 D_1 的 0.1% 。小型水轮机转轮的间隙可适当放宽。
- 7.2.5 对预期磨损严重的水轮机,应提供比普通更长的水轮机转轮进出口型线样板。对大中型水轮机,应增加转轮不同断面进出口型线样板个数。

8 水轮机安装

- 8.1 水轮机安装应按 GB/T 8564 的规定执行,涉及水轮机过流部件的安装质量应从严控制。
- 8.2 对于高水头混流式水轮机,安装时应严格控制转轮各部位(包括上冠与下环外缘、上梳齿止漏环与下止漏环等)间隙与导叶端面间隙,对于导叶端面间隙还应考虑蜗壳充水后顶盖与底环的变形量。
- 8.3 对于轴流式水轮机,安装时应按 7.2.4 的规定控制转轮室与叶片外缘间的间隙。

9 水轮机运行与检修

9.1 水轮机运行

- 9.1.1 水轮机应在技术协议中规定的工况范围内运行。
- 9.1.2 对于转桨式水轮机,应保持在协联工况下运行,宜用相对效率试验等方法修正其协联关系。
- 9.1.3 水轮机应避免在不压水情况下作调相运行。汛期不宜以空载备用方式运行。
- 9.1.4 高水头水轮机停机时应关闭进水阀或圆筒阀。
- 9.1.5 汛期运行时宜打开冲排沙设施进行排沙。
- 9.1.6 修建在山区河流上的水电站,若过机泥沙呈陡涨陡落的形式变化,可在沙峰期内短期停机避沙。
- 9.1.7 汛期运行时应注意观察顶盖漏水量与压力的变化,以判断止漏环的磨损情况。
- 9.1.8 水力测量管路应定期进行冲洗,防止因管路堵塞造成测量失效或失真。
- 9.1.9 对大型水轮机的过机泥沙情况应定期进行观测。观测时的采样与分析方法可参考附录 C.3。
- 9.1.10 从机组试运行起,遵循以下规定:
 - a) 应对每台水轮机的运行情况与工况参数(包括上下游水位、水头、转速、导叶开度、流量、出力、各项表计读数等)进行详细记录。
 - b) 宜定期对水轮机能量性能进行检查。对大型水轮机,可分别在汛期前后在相同的水头条件下对机组的出力、效率等进行试验来检验其变化。出力、效率的检验可采用相对效率法进行。
 - c) 应定期对水轮机磨损情况进行检查。宜在每个汛期前后各停机一次进行观察检查,特别是初期投入运行的水轮机。检查时应详细观察和测量记录运行后表面破坏的情况(如部位、外貌形态、深度、面积等),间隙的变化等。观测方法参见附录 C.2。

9.2 水轮机检修

- 9.2.1 水轮机检修可按照 DL/T 838 的规定执行。如发现问题应及时停机处理。
- 9.2.2 水轮机检修时应应对各个部件的破坏进行检查和记录(包括拍照),并将检查结果与上一次记录的结果进行对比,分析其原因并进行处理。

10 水轮机泥沙磨损的保证值

10.1 磨损保证条件

10.1.1 在保证期内水电站与水轮机运行过程中,实际的过机泥沙条件不超过设计所给定的条件。

10.1.2 在保证期内水轮机的运行条件应基本符合 GB/T 15468 的要求。

10.2 磨损的保证值

10.2.1 水轮机泥沙磨损保证期不宜短于 4 年。对预期磨损情况轻微和中等的大型水轮机,其保证期可延长;对预期磨损情况严重的小型水轮机,保证期可缩短。

10.2.2 在保证期内水轮机能量指标应达到下列要求:

- a) 因磨蚀导致的水轮机效率降低,对大型水轮机不应超过 2%,对小型水轮机不应超过 4%;
- b) 在运行参数相同的条件下,因磨蚀导致的水轮机功率降低,对大型水轮机不应超过 2%;对小型水轮机不应超过 4%。

10.2.3 在保证期内水轮机磨损量指标应达到下列要求:

- a) 水轮机叶片出水边不应磨穿。对大型水轮机叶片,磨损最大厚度不应超过叶片出水边厚度的 2/3。
- b) 普遍磨损的最大深度不应超过 4 mm。抗磨板的局部磨损不应超过 10 mm 或不应磨穿,其他部位的局部磨损的最大深度不应超过 8 mm。各个过流部件允许的磨损深度不应危及水轮机安全运行。磨损深度的测量方法可参见附录 C.2。
- c) 各类止漏装置的间隙的扩大不应超过设计间隙的一倍。
- d) 对采用涂层的部件,涂层破坏面积不应超过全部涂覆面积的 5%~10%,小型水轮机可取较大值。涂层脱落或破坏处的母材不应发生严重的磨蚀。

附 录 A
(资料性附录)
磨损试验装置与试验方法

A.1 磨损试验的分类

磨损试验按试验的不同目的可分成以下4类:

- a) 材料抗磨性能对比与评价试验;
- b) 磨损特性与规律试验;
- c) 水轮机抗泥沙磨损能力试验;
- d) 工程问题的技术论证试验。

A.2 材料磨损试验应满足的试验条件

为使试验室材料磨损试验结果更符合水轮机实际,所选择的材料磨损试验装置与试验方法应满足以下条件:

- a) 试验装置的磨损状态与性质应与水轮机磨损部件(或部位)相似;
- b) 试验磨损参数应与水轮机运行条件相近,如速度、泥沙磨粒特性与含沙量等;
- c) 试验试件材质应与水轮机部件拟采用的材料相同或相近;
- d) 试验水质应与水轮机内水质相同或相近。

A.3 材料磨损试验装置与试验方法

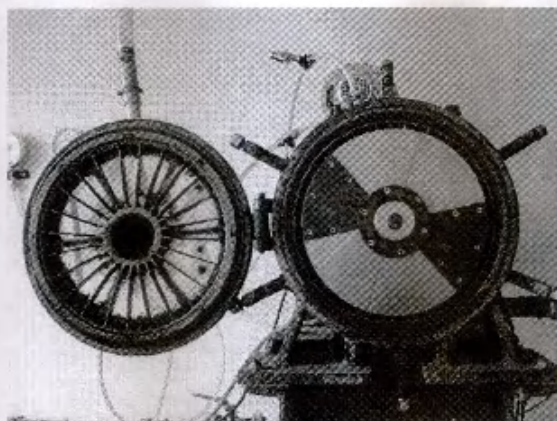
A.3.1 圆盘式绕流磨损试验方法

A.3.1.1 方法简述

圆盘式绕流磨损试验装置为圆盘在有含沙水与设有阻流栅的圆盘室中旋转,形成圆盘盘面与水流的相对流动,使得盘面(或试件)磨损。

圆盘盘面上的试件有两种布置方式:一种为6或8块扇形试件拼成圆盘;另一种为6或8块圆形试件镶嵌在圆盘上。采用扇形试件的试验装置简介如下:

试验装置中的试验段见图A.1a)。圆盘盘面可由6或8块扇形试件(通常对称的2块试件为同一种试验材料)拼接而成,见图A.1b)。



a) 试验段



b) 圆盘盘面

图 A.1 圆盘式绕流磨损试验装置试验段与圆盘

试验后试验材料的磨损量采用测量磨损深度的方法确定,即在选定的圆盘半径及测量点测量磨损深度。由于沿圆盘半径方向不同半径各点的圆周速度不同,因而对应各半径点的磨损量也不同,通过试验可得到试验材料的磨损率(或单位磨损率 E_s)与圆周速度 U 的关系曲线。该结果中的圆周速度可以修正换算成相对流速,可用于平面绕流磨损的预估。如试验材料为3种(分别用材料A、材料B和材料C表示),则得到3条关系曲线,见图A.2。磨损率小的曲线位于图形的下方(如图中的材料C),其抗磨性好,越靠上的曲线其抗磨损性越差(如图中的材料A)。从图A.2可直接看出不同材料的抗磨性强弱。通过换算也可以用抗磨倍数表示各种材料的抗磨性。

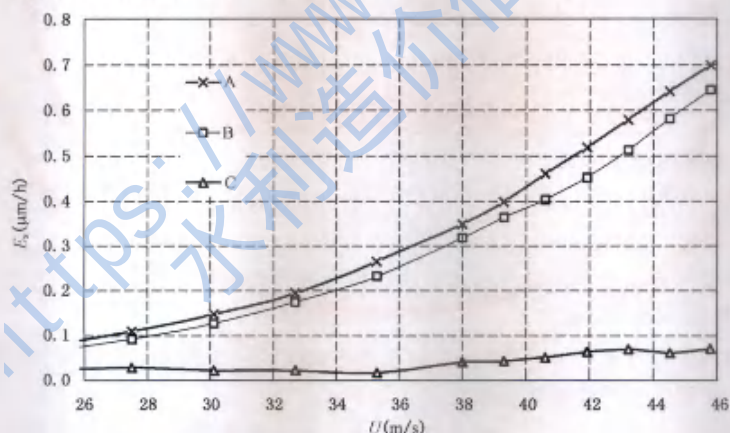


图 A.2 单位磨损率与圆周速度的关系曲线

A.3.1.2 主要参数

圆盘式绕流磨损试验的主要参数包括:

- 圆盘直径:360 mm 左右;
- 圆盘与阻流栅的间隙:8 mm~10 mm;
- 圆盘旋转速度:2 500 r/min~3 000 r/min;
- 圆盘室内压力:0.05 MPa~0.1 MPa;

——试验时圆盘室内水温： $15\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

A.3.1.3 主要特点

圆盘式绕流磨损试验方法的主要特点如下：

- 本方法的磨损属于小角度平顺绕流磨损，材料破坏机理与叶片流道等的磨损较为相近；
- 磨损量采用磨损深度或失重测量，可得到磨损量（或单位磨损率 E_s ）与圆周速度（可换算成相对速度）的对应关系；
- 试验较为方便，并可得到多种材料抗磨性的相对比较。

A.3.2 旋转喷射磨损试验方法

A.3.2.1 方法简述

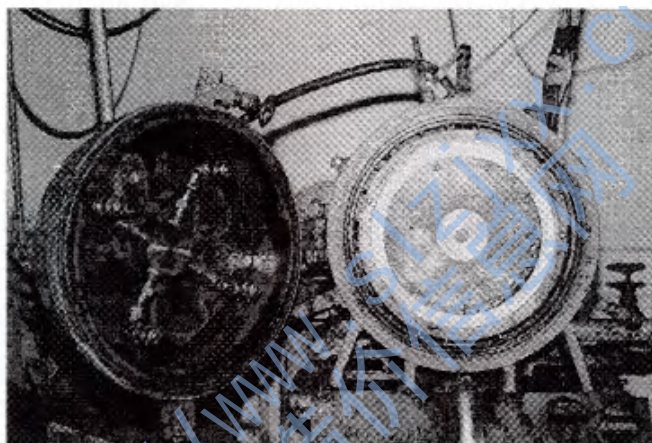


图 A.3 旋转喷射磨损试验装置试验段

旋转喷射磨损试验装置试验段见图 A.3，旋转圆盘由若干块（图中为 18 块）梯形试件沿分布圆（图中为 $\phi 300\text{ mm}$ ）拼接而组成圆环面，含沙水流从对称的 4 个喷嘴射向试件，造成试件表面磨损破坏。作用在试件上的水流相对速度 $\vec{W}$ 为作用点处的圆周速度 $\vec{U}$ 与喷嘴射流速度 $\vec{V}$ 之矢量和，即 $\vec{W} = \vec{U} + \vec{V}$ 。若改变圆盘转速、喷嘴射流速度的大小或方向，可改变 $\vec{W}$ 的大小及冲角。通过测量各个试件磨损量（失重或破坏深度），可得到不同试件（试验材料）的磨损破坏大小。

为比较不同材料的相对抗磨性，可取某种材料为基准材料（如 0Cr13Ni5 不锈钢），其磨损量用 G_1 表示，其他材料的磨损量用 G_i 表示，材料的抗磨倍数用 ϵ_i 表示。则按下式可得到不同材料的抗磨倍数。

$$\epsilon_i = G_1 / G_i$$

即基准材料的抗磨倍数为 1，若其他材料的抗磨倍数大于 1，表明该材料抗磨性优于基准材料。反之，表明该材料抗磨性比基准材料差。

A.3.2.2 主要参数

旋转喷射磨损试验的主要参数包括：

- 喷嘴对圆盘上试件的作用点分布直径： 300 mm 左右；
- 圆盘旋转速度： $2\,500\text{ r/min}\sim 3\,000\text{ r/min}$ 。

A.3.2.3 主要特点

旋转喷射磨损试验方法的主要特点如下：

- 磨损的属性为冲击式磨损；
- 磨损量采用失重法、破坏深度或破坏面积测量，试验速度为单一值，可用于定性分析；
- 试验较为方便，并可得到更多种材料的抗磨性的相对比较。

A.3.3 收缩断面式小水洞磨损试验方法

A.3.3.1 方法简述

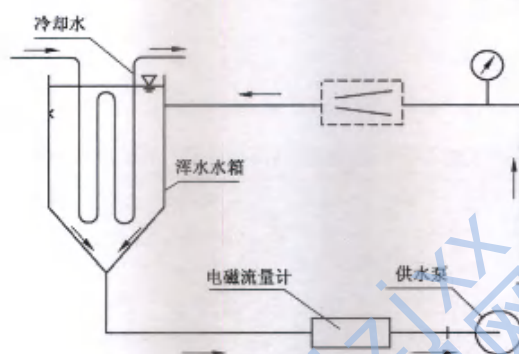


图 A.4 小水洞试验装置系统示意图

图 A.4 为小水洞磨损试验装置系统示意图。试验段为矩形收缩流道（从进口到出口上、下两面高差逐渐变小，两侧面宽不变），上、下两面为试件，侧面为高抗磨性材料。循环水系统由高扬程泵供水，试验过程保持流量不变。因试验段为收缩流道，从进口到出口各断面水流流速是逐渐增加的，对应的磨损量也逐渐增加。通过测量试验前后试验段各断面轮廓线得出各断面磨损深度，可得到磨损量与流速的关系。

A.3.3.2 主要参数

小水洞试验段的流速范围为 25 m/s~45 m/s。

A.3.3.3 主要特点

小水洞磨损试验方法的主要特点如下：

- 水力磨损条件接近于水轮机的平面绕流磨损；
- 磨损量采用磨损深度测量，可得到磨损量与速度的对应关系，可用于绕流磨损的定量分析；
- 水洞试验一次只能得到一种材料的试验结果。

A.3.4 其他类型的磨损试验装置与试验方法

在使用其他类型的磨损试验装置与试验方法时，需注意区分试验结果中不同类型磨损的影响，以及参数对试验结果的影响。

A.4 磨损试验中的参数与测量

A.4.1 试验时间

试验时间大致以试件被磨损后的破坏量便于测量来确定。试验时间的长短除了主要与被试材料的

抗磨性能及其他磨损参数有关外,也与所选择的试验方法有关。

由于试验用沙是循环使用的,为保证试验沙的磨损特性不发生明显变化,应定期更换一次试验用沙。对同一种试验方法,试验时段应保持一致。

A.4.2 试验流速

不同试验方法中的试验流速的定义各不相同。

圆盘式绕流磨损试验中的试验流速主要取决于圆盘的旋转速度,各测点的圆周速度与对应点的相对流速存在一定的差异,在用于水轮机的定量分析时,应将各测点的圆周速度通过修正换算成相对流速。

旋转喷射磨损试验中的试验流速为单一值。其大小取决于圆盘的旋转速度与喷嘴射流的速度及冲角。

小水洞磨损试验的速度主要由试验断面的尺寸(包括磨损后的变化)与过流量来决定,故对断面尺寸与流量的测量应注意保证测验的精度。速度的范围取决于断面的收缩率,由于试验段尺寸较小,故收缩率不宜过大。

A.4.3 含沙量及其测量

试验含沙量最好应与实际水轮机过机含沙量相近,但受试验时间的限制,试验含沙量可以加大,对于重要试验,应进行含沙量与磨损的关系试验。

含沙量的测量可采用定时取水样的方法进行测量。用标准量筒取水样,通过滤纸对水样过滤烘干后进行称重,即可得到含沙量。对同一种试验方法,定时取水样的时间间隔应一致。

在一个试验时段内的取水样次数应不少于3次。各次取水样得到的含沙量的均值即为本次试验的含沙量。

A.4.4 泥沙特性分析

泥沙特性分析包括泥沙粒径、泥沙矿物成分与含量,以及泥沙形貌分析等。

泥沙粒径分析应给出泥沙粒径级配、中值粒径与平均粒径等数值;泥沙矿物成分及含量分析应按不同泥沙粒径分别给出矿物成分及含量;泥沙形貌分析应提出泥沙颗粒的形貌特征。

A.5 磨损试验中的注意事项

A.5.1 在选择试验方法时,应尽可能满足A.2中的4个试验条件,特别是其中第一个条件。当所采用的试验装置与试验方法的水力磨损条件与实际水轮机有差异时,应对这种差异对试验结果的影响进行分析,包括对实际应用后可能造成的后果进行评价。当使用条件与试验条件的差异很大时,其试验结果不宜直接用于实际应用。还应注意不同试验装置与试验方法所得出的材料相对抗磨倍数不宜进行直接比较。

A.5.2 试件的表面加工要求应与水轮机相同或相近,试件的装配应平整。磨损的水力条件与试件的形式宜做成能反映单一磨损性质的破坏,而不宜是多种破坏(例如平面绕流加冲击磨损)的综合结果。

A.5.3 在对材料的抗磨性评价时,往往涉及材料的抗空蚀性。由于目前还无法确切了解与模拟水轮机发生磨损与空蚀联合作用时的磨损强度与空蚀强度,故不宜将磨损与空蚀两种破坏形式在同一试验中进行。为满足工程实用的需要,可分别进行材料的磨损与空蚀试验,根据两项试验的结果进行综合评价,如材料的抗磨性与抗空蚀性均良好,则预期该材料具有良好的抗磨蚀性能。

A.5.4 所有试验室的试验都无法模拟实际水质长期作用(如电化学腐蚀等)的影响。因此在评价材料

的耐磨性能时,优先推荐使用耐腐蚀性能较好的材料,如不锈钢等。

A.5.5 试验室试验可作为鉴定材料性能的初步筛选之用。在大规模推广应用于水轮机前,应在实际水轮机上或磨损条件相近的中间机组上进行较长时间的试验检验。

附录 B

(资料性附录)

水轮机常用材料与防护材料的应用情况

B.1 概述

水轮机常用母材和防护材料包括金属材料、金属防护材料与非金属防护材料。以下是国内常用的一些母材与防护材料的抗磨性能及应用情况：

- a) 金属材料：包括不锈钢、低合金钢、碳钢等。其应用情况与抗磨性能见表 B.1。
- b) 金属防护材料：包括 WC 喷涂涂层、喷焊材料、焊材等。其应用情况与抗磨性能见表 B.2。
- c) 非金属防护材料：包括环氧金刚砂涂层、聚氨酯涂层、超高分子量聚乙烯材料等。其应用情况与抗磨性能见表 B.3。

表 B.1 金属材料的应用情况与抗磨蚀性能

材料	应用情况	抗磨蚀性能
碳钢	可用于易磨损部位以外的部位	抗磨蚀性差,但较铸铁好
20SiMn 低合金钢	20 世纪七八十年代应用较多	抗磨蚀性稍强于碳钢
0Cr13Ni4Mo 不锈钢	目前普遍应用	抗磨蚀性较好
0Cr13Ni5Mo 不锈钢	部分替代 0Cr13Ni4Mo 应用	抗磨蚀性较好
0Cr16Ni5Mo 不锈钢	多用于高水头混流式水轮机	抗磨蚀性较好
1Cr18Ni9Ti 不锈钢	20 世纪七八十年代应用较多	抗磨蚀性比 0Cr13Ni5Mo、0Cr16Ni5Mo 等稍差

表 B.2 金属防护材料的应用情况与抗磨蚀性能

材料及工艺	使用情况(修复或防护)	抗磨蚀性能
氧乙炔喷焊	小水轮机上应用	抗磨蚀性较好,但易变形与开裂
耐磨 I 号焊条	较多用于磨损部件的修复	抗磨蚀性较好,易裂不易打磨
奥 102 焊条	较多用于磨损部件的修复	抗磨蚀性较好
WC 涂层(HVOF)	应用较多,不适用空化较强区域	抗磨蚀性好,工艺要求高

表 B.3 非金属防护材料的应用情况与抗磨蚀性能

材料	使用情况	抗磨蚀性能
聚氨酯涂层	部分机组应用	不适于空化区域
环氧金刚砂涂层	部分机组应用,涂层厚度不易控制,型线很难保证	抗磨能力好,不适于空化区域
超高分子量聚乙烯	用于抗磨板等,部分机组应用	抗磨蚀性好

B.2 注意事项

使用材料应注意的事项如下:

- a) 对于易磨损部位,宜采用不锈钢材料或防护材料;
- b) 一般说来,硬度较高的材料的抗磨性比硬度较低的材料好,如 0Cr13Ni4Mo 不锈钢的抗磨性比 1Cr18Ni9Ti 不锈钢好;
- c) 采用异种钢焊接的转轮,需注意焊缝处有促进电化学腐蚀而加剧局部磨蚀的可能;
- d) 采用金属与非金属防护材料时,都要严格注意材料的成分与质量。各种涂层在敷设前应注意母材表面的处理与施工工艺,特别是在现场施工时还要注意施工环境条件(包括温度、湿度等),不然将影响涂层的黏结强度与性能,而易于脱落。

附 录 C
(资料性附录)
水轮机磨损的观测

C.1 基础资料记录与存档

C.1.1 一般要求

为掌握水轮机的磨损情况,应记录与保存水电站与水轮机设计、制造、安装、运行等方面的资料。

C.1.2 水电站和水轮机的原始资料

C.1.2.1 水电站与水轮机基本资料,包括:

- a) 水电站概况;
- b) 水文、水质和泥沙资料;
- c) 水轮机基本参数:型号、最高水头、最低水头、额定水头、额定转速、额定流量、额定功率、最大功率、吸出高度等;
- d) 水轮机性能曲线:模型综合特性曲线和运转特性曲线。

C.1.2.2 水轮机制造资料,包括:

- a) 水轮机设计图纸,包括水轮机结构和主要部件尺寸;
- b) 主要部件的材质和采用的表面防护材料;
- c) 主要部件材料的检验记录,如化学成分、机械性能、主要缺陷和处理情况等;
- d) 出厂检验记录,包括各部件尺寸、叶片型线、厚度、开口、表面粗糙度等。

C.1.2.3 水轮机安装资料,包括:

- a) 易磨损部件安装调试记录与原始尺寸,如叶片出水边厚度、止漏环、导叶端面间隙的初始数据等;
- b) 安装过程中发现和处理过的问题(主要是与磨损有关或有可能造成影响的问题)。

C.1.3 水轮机运行与检修资料

C.1.3.1 水轮机试运行资料。包括水轮机试运行以及试运行后的检查记录。

C.1.3.2 水轮机运行资料,包括:

- a) 水轮机运行工况参数的记录,特别是特殊工况(如开停机、甩负荷、补气等)的参数(如噪音、振动、补气等)记录。要注意观察不同工况尾水管出口的水流情况,如含气等;
- b) 水库运行情况(如泄洪、排沙等)记录;
- c) 水轮机过机泥沙资料。如无实测的过机泥沙资料,可采用上下游水文站或进出库的水文泥沙资料。

C.1.3.3 水轮机检修资料。检修记录中应包括水轮机破坏部位修复前的原始状况、检修方案(含修复材料和工艺等)、修复后状况等。

C.1.4 水轮机试验资料

水轮机历次试验的记录,包括试验内容、方法、结果及分析等。在电站进行的水轮机试验包括:效率试验(含相对效率试验)、补气试验、空化试验、噪声测试、压力脉动及振动试验、抗磨材料试验等。

C.2 水轮机磨损的观测

C.2.1 水轮机易磨损部位

C.2.1.1 轴流式水轮机

轴流式水轮机磨损的主要部位为叶片与转轮室。

叶片正面大面积的破坏主要是磨损。叶片磨损的特点为从进口到出口逐渐加重,外缘区磨损最为严重。叶片头部常在含沙水流冲击下形成沟槽,特别是靠外缘处。有时还夹杂有局部脱流与空蚀。叶片背面常夹杂有空蚀,特别是背面外缘区常受到间隙空化的影响而形成较严重的磨蚀区。在出水边外缘处甚至被磨穿而形成缺口。

在叶片轴线以及轴线以下的转轮室中环区,常因夹杂间隙空蚀而成为磨蚀联合作用区。

C.2.1.2 混流式水轮机

主要磨损部位为转轮、导水机构和止漏装置。随着水轮机运行水头升高,导水机构和止漏装置的磨损将超过转轮。

转轮的磨损主要发生在叶片及下环内侧面等处。叶片磨损从进口到出口,从上冠到下环愈来愈重。在叶片正面靠下环区常导致局部磨穿而形成缺口。

导水机构的磨损包括抗磨板和导叶的磨损。抗磨板的磨损主要表现为在抗磨板上形成导叶轮廓状的深沟状磨损。导叶的磨损主要发生在端面与立面出水边等处。

C.2.2 磨损分类

在进行磨损的观测时应注意观察与记录磨损的特征与形态,并据此区分磨损类型。一般说来,磨损的外貌大致可分成普遍磨损与局部磨损两大类。

普遍磨损是大面积的相对较均匀的磨损。其外貌特征主要为材料表面出现大面积的相对较浅较均匀的波纹、鱼鳞或沟条状痕迹。这些磨痕大多具有与水流方向相一致的方向性。普遍磨损主要发生在平顺的表面上,如叶片表面等。

局部磨损则表现为局部出现面积不大但磨损较深,并与周围磨损有明显差别的深沟或深坑等。局部磨损的产生大多产生于流态发生急剧变化(如水流有较大冲角、急剧拐弯、旋涡脱流等区域)以及材质有缺陷等的部位上。如叶片头部、间隙进口、抗磨板等。

C.2.3 磨损量的测量

C.2.3.1 概述

磨损量的测定通常是近似的。磨损量的测定包括对磨损的面积与深度等的测定,可采用目测观察与直接测量等方法。

目测观察即对磨损部位及其严重状况进行目测、观察与记录。

直接测量即采用测量工具对磨损量进行测定与记录。

C.2.3.2 磨损面积的测定

局部磨损的面积较小,相对较易确定,可采用测量工具直接测量。而普遍磨损的面积较大,由于波纹状、鱼鳞状或沟条状痕迹较浅,通常较难准确确定磨损的边界与面积,可采用目测观察与直接测量等方法近似确定磨损面积。

C.2.3.3 磨损深度的测定

磨损深度的测定按磨损的分类分别测量,即分别对普遍磨损的深度与局部磨损的深度(包含普遍磨损的深度)进行测量。普遍磨损的深度可采用近似的方法测量,局部磨损的深度可采用测量工具直接测量。具体测量时可按下列步骤进行:

- a) 磨损深度的计算,其原始值应以水轮机出厂检验记录及安装后的测定为准;如缺乏上述资料,可用水轮机设计尺寸代替。
- b) 对于不同的部位(磨损保证所考查的部位),应根据各自的特点而采用不同的测量方式:
 - 水轮机叶片出水边。应测量叶片磨损后的厚度,与原始数据比较后得到叶片减薄量。叶片厚度测量视现场环境采用直接测量的方法。
 - 水轮机抗磨板与导叶端面。可采用直接测量方法测量局部磨损的深度以及间隙值。
 - 水轮机各类止漏装置。主要应测量其间隙变化量。

C.2.3.4 测量记录时应绘制草图

对所有的破坏应绘制草图,注明测量的位置和破坏的外貌特征、磨损深度和面积等。有条件时最好能进行拍照。

C.2.4 磨损观测资料的整理与分析

具体要求如下:

- a) 磨损观测后应对资料进行整理与保存;
- b) 应结合原始资料对磨损观测的结果以及对引起磨损破坏的原因进行分析,提出改进措施。

C.3 过机泥沙的测定

C.3.1 取样位置

取样位置宜选择在水轮机进、出水管中及进、出水口前后合适的位置,包括进水口前、压力管道、蜗壳、尾水管锥管与出水口后等处。选择取样位置时应注意以下几点:

- a) 取样位置宜选择在水流扰动充分、泥沙分布相对较为均匀的部位,如尾水管,其次是压力钢管或尾水管出口等处;
- b) 在不具备从水轮机流道中取样的条件下,也可从进水口或河道取样。从河道取样所得到的结果可能存在一定的偏差,可供近似参考。

C.3.2 取样间隔及取样方式

非汛期泥沙较少,可每隔一个月或更长时间取样一次。汛期则视泥沙含量变化情况确定不同的取样间隔。可按每周、每天取样一次,在泥沙含量高峰期,可按几小时取样一次。

有条件时可在尾水管或其他合适部位装设自动连续测量的含沙量测定仪。

取样时,应先放出管道内的残留水再取样,以保证所取水样和流道内水体一致。

C.3.3 含沙量的测定

将取得的水样倒入标准量筒中,确定其体积,再通过滤纸对水样过滤,对残留的固体物进行烘干后称重,即可得泥沙含量。

也可将沙水直接进行称重,然后与同体积的清水相比,即可计算得出含沙水的比重,进而换算出含沙量。此法适用于泥沙含量较高时。

也可采用其他适宜的方法。

C.3.4 泥沙特性分析

泥沙特性分析可参见 A.4.4。

C.3.5 注意事项

过机泥沙测定中的注意事项如下：

- a) 过机泥沙测定中应注意各台机组的过机泥沙可能会有差异，应对不同机组分别进行取样测定。当电站的机组台数较多时，可选择其中几台进行取样测定；
- b) 过机泥沙的测定应和水轮机磨损的观测同步进行；
- c) 过机泥沙的测定应长期坚持进行，不宜以某一时段所获得的过机泥沙数据来代表机组长期运行的过机泥沙数据。

http://www.slzjxx.cn
水利造价信息网

中 华 人 民 共 和 国
国 家 标 准
反击式水轮机泥沙磨损技术导则

GB/T 29403—2012

*

中国标准出版社出版发行
北京市朝阳区和平里西街甲2号(100013)
北京市西城区三里河北街16号(100045)

网址 www.spc.net.cn
总编室:(010)64275323 发行中心:(010)51780235
读者服务部:(010)68523946

中国标准出版社秦皇岛印刷厂印刷
各地新华书店经销

*

开本 880×1230 1/16 印张 1.75 字数 42 千字
2013年4月第一版 2013年4月第一次印刷

*

书号: 155066·1-46499 定价 27.00 元

如有印装差错 由本社发行中心调换
版权专有 侵权必究
举报电话:(010)68510107



GB/T 29403-2012