



WUHAN UNIVERSITY PRESS
武汉大学出版社



水工钢闸门检测理论与实践

武 汉 大 学 学 术 丛 书

Academic Library

Wuhan University

刘礼华
陈欧光
陈五一
著

武汉大学学术丛书
Wuhan University Academic Library

水工钢闸门检测理论与实践



刘礼华
陈欧五
珠光 著



武汉大学出版社
WUHAN UNIVERSITY PRESS

图书在版编目(CIP)数据

水工钢闸门检测理论与实践/刘礼华,欧珠光,陈五一著. —武汉:武汉大学出版社,2008.8

武汉大学学术丛书

ISBN 978-7-307-06480-5

I. 水… II. ①刘… ②欧… ③陈… III. 钢闸门—检测 IV. TV663

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 123715 号

责任编辑:王金龙 责任校对:刘欣 版式设计:支笛

出版发行:武汉大学出版社 (430072 武昌 珞珈山)

(电子邮件:wdp4@whu.edu.cn 网址:www.wdp.com.cn)

印刷:武汉中远印务有限公司

开本:720×980 1/16 印张:37.25 字数:527千字 插页:3

版次:2008年8月第1版 2008年8月第1次印刷

ISBN 978-7-307-06480-5/TV·31 定价:82.00元

版权所有,不得翻印;凡购我社的图书,如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请与当地图书销售部门联系调换。



武汉大学学术丛书
自然科学类编审委员会

主任委员 ▶ 刘经南
副主任委员 ▶ 卓仁禧 李文鑫 周创兵
委员 ▶ (以姓氏笔画为序)

文习山	石 兢	宁津生	刘经南
李文鑫	李德仁	吴庆鸣	何克清
杨弘远	陈 化	陈庆辉	卓仁禧
易 帆	周云峰	周创兵	庞代文
谈广鸣	蒋昌忠	樊明文	

武汉大学学术丛书
社会科学类编审委员会

主任委员 ▶ 顾海良
副主任委员 ▶ 胡德坤 黄 进 周茂荣
委员 ▶ (以姓氏笔画为序)

丁俊萍	马费成	邓大松	冯天瑜
汪信砚	沈壮海	陈庆辉	陈传夫
尚永亮	罗以澄	罗国祥	周茂荣
於可训	胡德坤	郭齐勇	顾海良
黄 进	曾令良	谭力文	

秘书长 ▶ 陈庆辉

序

水工钢闸门是水利水电枢纽建筑物的主要组成部分之一，其运行状况直接影响到工程的适用性、安全性和耐久性，国内外都有因闸门故障而导致整个枢纽出事的教训。近年来，随着水利水电枢纽规模的不断大型化，水工钢闸门的尺寸和荷载也不断刷新纪录，达到过去难以比拟的水平，闸门安全问题也显得更为重要。

和大体积混凝土建筑物相比，水工钢闸门似乎是较为简单的结构，但是，我们必须看到闸门有它的特殊性。首先，为了挡水、泄洪，闸门在其寿命期内，要经受成千乃至上万次的启闭操作，要承受高速水流引起的剧烈、复杂的震动（流固耦合震动）；其次，水工钢闸门是由薄壁构件组成的金属结构，更容易受到空蚀和锈蚀的破坏。因此，它也更需要在运行期内加强监测和维护。

为此，20 世纪 70 年代后，我国有关科研院（所）就开始了大型在役闸门进行原型检测的研究活动，如：西津电站表孔平面闸门振动原型检测、丰满电站深孔弧形闸门振动原型检测等。随着水电事业的发展和科学技术的进步，1995 年国家首次发布了《水工钢闸门和启闭机安全检测技术规程》，对水工钢闸门检测内容和周期提出了明确的要求，加强了在役水工钢闸门运行的安全质量管理。

《水工钢闸门检测理论与实践》一书内容丰富、层次分明，首先详尽阐述了水工钢闸门的种类、特点、结构组成、结构计算基本理论，并举例加以说明，使读者对水工钢闸门有比较全面系统的了解；然后用较大篇幅介绍了水工钢闸门材料力学性能、腐蚀状况、无损探伤、静动态检测、启闭力检测的理论与技术方法，包括检测系统与仪器和结构有限元计算与分析等内容；此外，针对水工钢闸门检测特点、测点如何布置、仪器测试系统如何选取与标定、传感器如何安装与防护、测试数据如何处理、应力折减系数与闸门振动判据如何选取、人字门斜背拉杆预应力如何调试、冲击荷载作用下如何进行闸门安全监测等若干技术问题作了专题介绍；最后介绍了闸门测试误差分析、检测数据的处理与振动信号频谱分析理论，并提出了对闸门进行可靠度鉴定与耐久性评估的一般方法。

作者从理论原理、检测方法、仪器使用和工程检测实例等方面，较系统地撰写了《水工钢闸门检测理论与实践》全书内容。该书吸收了当前闸门检测的先进技术，具有多学科（如钢结构设计理论、信号采集与处理、结构计算与分析等）交叉融合的特点，是一本学术性与实用性相结合的专著。作者把闸门检测理论与多年工程经验结合起来，提出了许多自己的创新观点与建议，在内容编排上，该书还有系统性强、理论联系实际、叙述深入浅出、内容精练、结构紧凑等特点。

水工钢闸门的安全检测与评估现已日益普及，闸门检测技术对水利水电事业的作用日益明显，但目前还没有见到有关水工钢闸门检测理论系统内容的专著。自然侵蚀、结构损伤及功能改变都会涉及水工钢闸门的检测与评估，该书的出版将填补我国在这方面的空白，也必将促进水工钢闸门现代检测理论和方法在水利水电工程中的普及与应用。是为序。

潘家铮

中国科学院院士

中国工程院院士

2008年4月18日

前 言

由于水工钢闸门在水利水电枢纽中起着特殊作用——挡水与防洪，所以水工钢闸门的安全运行一直是人们关注的主要问题之一。

目前，水工钢闸门采取的是“静态设计、动态校核弥补”的工程设计方法，即根据静态荷载进行闸门设计计算，由动态状态进行校核弥补。动态校核弥补表现在两个方面：一是设计之前进行闸门泄水模型试验；二是闸门建成之后进行现场原型振动测试（校核弥补的主要方式），通过这些工作来评价闸门的安全性。事实上，一个闸门从建成到安全运行若干年后，由于自然环境的影响，施工、管理的保护维修不及时等人为因素的影响，闸门的焊缝错台、咬边、虚焊、漏焊、未焊透，闸门的金属构件锈蚀、损坏、老化脱落，闸门的止水橡皮磨损、老化脱落等现象相当常见，致使闸门由一个安全的门逐渐转变成一个不安全的门。为此，不少的水利水电工作者曾向我们咨询：应如何开展这方面的评价工作？

当前，无论在国内还是在国外，都没有关于闸门的现场检测理论与技术方面的专著，为了适应水利水电事业的蓬勃发展，满足与水工钢闸门设计、施工、研究、运行和管理等相关专业人员的需要，经过慎重考虑，我们决定尽己所能，从实际使用的角度，将自

已近 10 年来的研究成果和所掌握的有关理论知识及工作实践经验汇集成册,介绍给大家,以便使读者对水工钢闸门检测相关的理论与技术有全面的了解。

本书关于钢闸门检测的工程实践数据主要取材于 10 多年来湖北、湖南、四川、江西、浙江、安徽、福建、重庆、广西等省、市、自治区的 20 多个大、中型水利水电工程的金属结构安全检测和复核的评估报告。

本书对水工钢闸门检测技术理论与实践做了专门介绍,全书共分 11 章。

第 1 章介绍水工钢闸门的种类、特点、结构组成、结构计算的基本理论及工程实例。

第 2 章主要介绍钢闸门材料的化学成分及材料力学性能的检测理论与技术。

第 3 章叙述闸门的腐蚀状况、腐蚀检测理论、检测仪器、检测方法及其工程实例。

第 4 章介绍水工钢闸门的无损探伤理论、探伤仪器设备、探伤方法、基于神经网络的闸门损伤检测法及闸门的无损探伤工程实例。

第 5 章主要介绍闸门的静态检测系统与仪器,检测仪器分类、工作原理、工作特性,静态应变测量的方法及静态检测工程实例。

第 6 章主要介绍闸门动态检测的内容、动态特性参数的检测基本原理和方法、测试系统与仪器及动态特性参数识别,闸门动应变、振动加速度及振动位移的测试系统、仪器及测试方法和动态测试的工程实例。

第 7 章介绍闸门动力有限元分析法的基本理论、方法、计算力学模型及闸门有限元计算的工程实例。

第 8 章介绍闸门启闭力的理论计算方法、卷扬式启闭机、液压式启闭机的启闭力的检测方法、检测系统、仪器及检测的工程实例。

第 9 章主要介绍水工钢闸门检测的测点布置、仪器设备选用、测试仪器及系统的标定、传感器的安装与防护、导线安装与防护、

干扰信号的防范、测试数据的处理、应力折减系数、闸门振动判据、船闸人字门背拉杆预应力调试的计算与方法和冲击荷载作用下的闸门安全监测方法等若干技术问题。

第10章简要介绍闸门测试误差分析、检测数据的处理分析与振动信号的频谱分析理论与方法。

第11章介绍闸门在外观检查、质量检测 and 结构计算分析的基础上,根据需要可对闸门的使用作可靠度鉴定并对其耐久性作出评估。

本书在撰写过程中,承蒙中国水电顾问集团中南勘测设计研究院总工冯树荣教授级高工(博导)和武汉大学土木建筑工程学院朱以文教授(博导)对本书审阅并推荐;得到中国水电顾问集团成都勘测设计研究院金属结构室和长江水利委员会长江勘测规划设计研究院金属结构室等单位相关技术人员的大力支持与帮助;还得到武汉大学土木建筑工程学院曾又林教授、张宏志高工、陈安元工程师的大力支持与帮助;研究生朱幽幽、陈亚鹏、吕念东、李翠华、熊威、夏梦、李文、魏晓斌等在闸门的结构计算、测试分析、数据整理以及资料收集等方面做了很多工作,特别是夏梦同学做了大量的打字、制图及核对工作,在此一并表示诚挚的感谢。

由于作者水平有限,书中的不当之处与错误在所难免,恳请广大读者批评指正。

作 者

2007年11月于武汉大学



中国当代哲学问题探索
中国辩证法史稿(第一卷)
德国古典哲学逻辑进程(修订版)
毛泽东哲学分支学科研究
哲学研究方法论
改革开放的社会学研究
邓小平哲学研究
社会认识方法论
康德黑格尔哲学研究
人文社会科学哲学
中国共产党解放和发展生产力思想研究
思想政治教育有效性研究(第二版)
政治文明论
中国现代价值观念的初生历程
精神动力论
广义政治论
中西文化分野的历史反思
第二次世界大战与战后欧洲一体化起源研究
哲学与美学问题
行为主义政治学方法论研究
政治现代化比较研究
调和与制衡
“跨越论”与落后国家经济发展道路
村民自治与宗族关系研究
中国特色社会主义基本问题研究
一种中道自由主义:托克维尔政治思想研究
社会转型与组织化调控

国际经济法概论
国际私法
国际组织法
国际条约法
国际强行法与国际公共政策
比较外资法
比较民法学
犯罪通论
刑罚通论
中国刑事政策学
中国冲突法研究
中国与国际私法统一化进程(修订版)
比较宪法学
人民代表大会制度的理论与实践
国际民商新秩序的理论建构
中国涉外经济法律问题新探
良法论
国际私法(冲突法篇)(修订版)
比较刑法原理
担保物权法比较研究
澳门有组织犯罪研究
行政法基本原则研究
国际刑法学
遗传资源获取与惠益分享的法律问题研究
欧洲联盟法总论
民事诉讼辩论原则研究

当代西方经济学说(上、下)
唐代人口问题研究
非农化及城镇化理论与实践
马克思经济学手稿研究
西方利润理论研究
西方经济发展思想史
宏观市场营销研究
经济运行机制与宏观调控体系
三峡工程移民与库区发展研究
21世纪长江三峡库区的协调与可持续发展
经济全球化条件下的世界金融危机研究
中国跨世纪的改革与发展
中国特色的社会保障道路探索
发展经济学的新发展
跨国公司海外直接投资研究
利益冲突与制度变迁
市场营销审计研究
以人为本的企业文化
路径依赖、管理哲理与第三种调节方式研究
中国劳动力流动与“三农”问题
新开放经济宏观经济学理论研究
关系结合方式与中间商自发行为的关系研究
发达国家发展初期与当今发展中国家经济发展比较研究



- 随机分析学基础
流形的拓朴学
环论
近代数论
鞅与Banach空间几何学
现代偏微分方程引论
算子函数论
随机分形引论
随机过程论
平面弹性复变方法(第二版)
光纤孤子理论基础
Banach空间结构理论
电磁波传播原理
计算固体物理学
电磁理论中的并矢格林函数
穆斯堡尔效应与晶格动力学
植物进化生物学
广义遗传学的探索
水稻雄性不育生物学
植物逆境细胞及生理学
输卵管生殖生理与临床
Agent和多Agent系统的设计与应用
因特网信息资源深层开发与利用研究
并行计算机程序设计导论
并行分布计算中的调度算法理论与设计
水文非线性系统理论与方法
拱坝CAD的理论与实践
河流泥沙灾害及其防治
地球重力场逼近理论与中国2000似大地水准面的确定
碾压混凝土材料、结构与性能
喷射技术理论及应用
Dirichlet级数与随机Dirichlet级数的值分布
地下水的体视化研究
病毒分子生态学
解析函数边值问题(第二版)
工业测量
日本血吸虫超微结构
能动构造及其时间标度
基于内容的视频编码与传输控制技术
机载激光雷达测量技术理论与方法
相对论与相对论重力测量
水工钢闸门检测理论与实
- 中日战争史(1931~1945)(修订版)
中苏外交关系研究(1931~1945)
汗简注释
国民军史
中国俸禄制度史
斯坦因所获吐鲁番文书研究
敦煌吐鲁番文书初探(二编)
十五十六世纪东西方历史初学集(续编)
清代军费研究
魏晋南北朝隋唐史三论
湖北考古发现与研究
德国资本主义发展史
法国文明史
李鸿章思想体系研究
唐长孺社会文化史论丛
殷墟文化研究
战时美国大战略与中国抗日战场(1941~1945年)
古代荆楚地理新探·续集
汉水中下游河道变迁与堤防
吐鲁番文书总目(日本收藏卷)
用典研究
《四库全书总目》编纂考
元代教育研究
中国实录体史学研究
分歧与协调
明清长江流域山区资源开发与环境演变
清代财政政策与货币政策研究
“封建”考论(第二版)
- 文言小说高峰的回归
文坛是非辨
评康殷文字学
中国戏曲文化概论(修订版)
法国小说论
宋代女性文学
《古尊宿语录》代词助词研究
社会主义文艺学
文言小说审美发展史
海外汉学研究
《文心雕龙》义疏
选择·接受·转化
中国早期文化意识的嬗变(第一卷)
中国早期文化意识的嬗变(第二卷)
中国文学流派意识的发生和发展
汉语语义结构研究
明清词研究史
新文学的版本批评
中国古代文论诗性特征研究
唐五代逐臣与贬谪文学研究
- 中国印刷术的起源
现代情报学理论
信息经济学
中国古籍编撰史
大众媒介的政治社会化功能
现代信息管理机制研究
科学信息交流研究
比较出版学
IRM-KM范式与情报学发展研究
公共信息资源的多元化管理

目 录

第 1 章 水工钢闸门计算的基本理论与方法	1
1.1 概述	1
1.2 平面钢闸门	4
1.3 弧形钢闸门	61
1.4 人字钢闸门	106
第 2 章 钢闸门材料检测	130
2.1 钢闸门材料	130
2.2 水工钢闸门材料力学性能检测	138
第 3 章 闸门腐蚀状况检测	145
3.1 概述	145
3.2 腐蚀检测仪器	146
3.3 腐蚀检测方法及其结果的可靠度分析	148
3.4 水工钢闸门腐蚀状况检测工程实例	150

第4章 无损探伤	168
4.1 概述	168
4.2 探伤仪器设备	169
4.3 水工钢闸门的无损探伤	178
4.4 水工钢闸门无损探伤工程实例	188
4.5 基于神经网络的闸门损伤检测	203
第5章 闸门的静态检测	210
5.1 闸门静态检测系统与仪器	211
5.2 电阻应变片的工作原理及其工作特性	212
5.3 电阻应变片的选用、粘贴与防护	216
5.4 电阻应变测量中的电桥原理及电桥的应用	221
5.5 静态应变测量	228
5.6 闸门静态检测工程实例	237
第6章 闸门的动态检测	251
6.1 概述	251
6.2 闸门动态特性参数(模态参数)的测试	253
6.3 闸门动应变(动应力)的测试	263
6.4 闸门振动加速度的测试	270
6.5 闸门振动位移的测试	275
6.6 闸门动态检测工程实例	277
第7章 闸门动力分析的有限元法	301
7.1 概述	301
7.2 闸门动力分析的基本理论	303
7.3 有限单元法	308
7.4 闸门门体结构动力有限元计算的力学模型	322
7.5 闸门结构动力有限元计算的工程实例	324
第8章 闸门启闭力检测	341
8.1 概述	341

8.2	闸门启闭力理论计算	342
8.3	卷扬式启闭机启闭力检测	359
8.4	液压式启闭机启闭力检测	369
8.5	闸门启闭力检测的振动频率法	373
第 9 章	闸门检测的若干技术问题	383
9.1	闸门测点布置	383
9.2	仪器设备的选用	384
9.3	测试仪器及其系统的标定	393
9.4	传感器的安装与防护	401
9.5	测量导线的有关问题	405
9.6	测试中的干扰信号及防范措施	407
9.7	测试数据的处理	411
9.8	闸门应力折减系数	425
9.9	闸门振动判据	431
9.10	船闸人字门斜背拉杆预应力调试的计算与方法	441
9.11	冲击荷载作用下的闸门安全监测方法	471
第 10 章	误差与检测数据分析	483
10.1	测试的基础知识	483
10.2	误差分析	494
10.3	检测数据处理分析	505
10.4	钢闸门振动信号频谱分析	517
第 11 章	闸门的可靠度鉴定	538
11.1	闸门可靠度鉴定的基础知识	539
11.2	闸门可靠度鉴定的方法及特点	546
11.3	闸门可靠度鉴定	549
11.4	闸门耐久性评估	561
参考文献		576

第 1 章

水工钢闸门计算的基本理论与方法

1.1 概 述

水工钢闸门是用来关闭和开启水工建筑物过水孔口的活动结构物。它是水工建筑物的重要组成部分,其安全可靠的运行对确保水工建筑物的使用效果具有重要意义。

水工钢闸门的种类很多,从其结构特征主要可分为平面闸门、弧形闸门和人字闸门;从其工作性质主要可分为工作闸门、事故闸门和检修闸门;从其闸室位置主要可分为非淹没式(露顶)闸门和淹没式(表孔、深孔)闸门;从其运行方式主要可分为非自动操作闸门(一般闸门)和水力自动操作闸门(为翻板闸门、舌瓣闸门和水箱水力自动弧形闸门等),等等。

水工钢闸门的主要特点有:

(1)原闸门设计理论和计算方法较多地按平面结构分析,未考虑闸门的整体性和构件间的共同工作,致使闸门偏于安全,某些构件有较大的强度储备。

(2)钢材料较其他材料轻便可靠、安全耐久、材料节省、加工方

便,抗震性能较好,但易于腐蚀生锈。

(3)长久与水接触,易于腐蚀、漏水,运行时易于振动。

(4)闸门的门体是由板、梁、柱或桁架通过螺栓、铆钉或焊接连接而成的,还附设有止水结构,门上还有起吊设备等。因此,连接构件的强度、防腐和维护,橡皮止水结构的耐久性等显得非常关键和重要。

由于水工钢闸门具有上述特点,经长期运行后,其面板、梁、柱及吊耳等会锈蚀、老化,连接构件也可能损坏、老化脱落,闸门整体性能受到影响,止水橡皮磨损、老化脱落而漏水,行走支承老化、磨损损坏,以及启闭设备和相关的电力设施损坏、老化,等等,均会影响水工建筑物的运行效果及安全。

据我们了解,在全国大大小小的水库、水电站、水渠中的钢闸门,经过长期运行之后,均出现过这样或那样的问题。如山东省黄河段的涵闸工程中就有 24 座涵闸门的面板或部件存在着不同程度的锈蚀,锈蚀部件主要是导轨、导轮、吊耳、吊环等,比较严重的有 12 座。又如江西省××水电站已运行 30 多年,发电主闸门受损严重,已全部换新;左岸溢洪道的三扇弧门的主梁腹板、小次梁、支臂与主梁连接处锈蚀严重,其中 1#弧门上主横梁右端后翼缘内板已锈穿;2#弧门下游面拉杆与下主梁连接处明显变形,弧门面板、主梁翼缘、纵向小次梁翼缘均有明显变形;三扇弧门的止水橡皮均老化,部分脱落,漏水严重。右岸溢洪道的两扇弧门主要腹板、小次梁、支臂与主梁连接处及连接螺栓锈蚀严重。其中左侧弧门上主横梁右端腹板及第四、五根小次梁的翼缘均已锈穿,右侧弧门小次梁也已锈穿,弧门主梁与支臂的连接螺栓锈蚀严重;两扇弧门的止水橡皮均老化、部分脱落损坏,漏水严重。江西省某水电站也已运行 40 多年,其溢洪道弧门面板、主梁、小横梁支腿等严重锈蚀,焊缝错边,止水橡皮老化、损伤,漏水严重。其启闭机表面也已锈蚀,减速箱漏油等。重庆市丰都县的某水电站虽然只运行 9 年,也有问题:其五扇弧门的拼接焊缝质量较差,错台、咬边、未焊透的较多,如 1#弧门左上支腿腹板一条连接焊缝明显开裂长达 550mm,宽达 1mm,隔板翼缘之间的连接缝错台 5mm,中孔弧门的止水橡皮老化,部分脱落,漏水严重。支铰处

螺栓、座板锈蚀,闸墙埋件表面锈蚀。中孔平门的滚轮、定向轮、螺栓及局部表面、翼缘表面锈蚀。五个门槽的埋件也已锈蚀。坝顶门机部分表面及螺栓锈蚀,控制系统装置老化,电线保护锈套锈蚀严重,部分已锈穿。

浙江省某流域一级电站已运行 10 多年,其工作门和检修门虽然都尚好,但其浅孔弧门的面板锈蚀明显,橡皮止水老化,漏水严重。二级电站也只运行 10 年左右,其溢洪道弧门的面板下部分防锈漆脱落、锈蚀,支腿表面也已锈蚀,主梁与面板连接处锈蚀严重,甚至形成 0.5mm 深的锈蚀坑,个别地方的橡皮止水老化损坏、漏水,启闭机油管漏油。

安徽省泾县某水电站运行多年以后,其中孔工作弧门在第一次维修喷锌前就已锈蚀,如面板、主梁腹板、支臂腹板有锈坑。维修后其表面又有锈蚀,现其止水橡皮老化、损坏、漏水,动水启动时振动厉害。中孔检修平门的滚轮表面锈蚀、转动不畅,闸门顶梁吊点处有锈蚀。底孔工作弧门的支臂隔板,吊点下游的翼缘板和闸门拉杆均腐蚀厉害,拉杆有锈坑,深达 1~2mm,面积占 95%,连接螺栓锈蚀,门槽衬板表面全部锈蚀,止水橡皮老化,漏水严重。闸门启闭机油漆老化,开度指示器不能正常工作。潜山县某水库运行 33 年后,其发电低涵进口的工作闸门门楣、门叶支腿锈蚀和变形均严重,在 200mm×200mm 面积内有 15 个直径 10mm、深达 1~2.5mm 的锈坑,启闭拉杆已锈蚀和变形,启闭不灵活。发电检修平门及启闭设备明显锈蚀,两侧滚轮已锈死不能转动。闸门顶部横梁翼缘变形达 15mm,止水橡皮老化、断裂损坏、漏水等。宿松县某水库也已运行 40 多年,其高低涵进口的两扇闸门在水下 20 多米,不能提出水面,无法检测。闸门启闭机为老式螺杆启闭机,均已锈蚀,部分监测设备已老化不能使用,拉杆锈蚀容易卡死。启闭机房在启闭时产生振动,线路设备老化损坏等。桐城市某水库运行了 40 多年,溢洪道不设检修闸门,其工作弧门一直挡水,止水橡皮老化、漏水严重,开启时啃轨、卡阻,启闭机室大梁、横梁有裂纹,钢丝绳断股。放水底孔工作弧门锈蚀严重,局部构件蚀余厚度只有 7mm,止水口橡皮老化、损坏等。

福建省闽江支流的某水电厂二级电站运行 30 多年后,尾水平面