

# 齿型构件混合堤翻坝水流力影响因素数值分析



贝建忠, 牟毅

(中交第四航务工程勘察设计院有限公司, 广东 广州 510290)

**摘要:** 齿型构件混合堤是长江深水航道一期工程中采用的一种新型混凝土构件混合堤, 该新型结构尚处于研究初期阶段。为了解其受力特性、推广其在工程中的应用, 基于 CFX 软件, 对齿型构件混合堤翻坝水流力影响因素进行数值分析。结果表明, 齿型构件混合堤翻坝水流力由动水压力及堤身前后静水压力差组成, 随着入射流速、入射角度及相对堤高的增大, 翻坝水流力越大; 当入射流速比较小时, 翻坝水流力与入射流速近似成平方关系, 当入射流速超过某个限值, 水流力与入射流速近似成正比关系; 相对堤高对翻坝水流力的影响有个敏感值, 相对堤高在敏感值附近变化时, 对翻坝水流力的影响最大。

**关键词:** 齿型构件混合堤; 翻坝水流力; 入射流速; 入射角度; 相对堤高

中图分类号: TV 865; U 656.2+3

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2022)04-0094-06

## Numerical analysis of impacting factors for current force over gear-type mixture embankment

BEI Jian-zhong, MOU Yi

(CCCC-FHDI Engineering Co., Ltd., Guangzhou 510290, China)

**Abstract:** The gear-type mixture embankment is a new concrete structure adopted in the first phase of the deep-water channel project on the Yangtze River, and the relevant study is still in an early stage. To analyze its mechanical features and expand its application in later engineering, we numerically analyze the impacting factors for the current force over the gear-type mixture embankment by the CFX software. The results show that the current force over the gear-type mixture embankment is composed of the hydrodynamic pressure and the hydrostatic pressure difference between the front and the back of the embankment body. The current force grows as the incident velocity, incident angle, and relative embankment height increase. The force and the incident velocity manifest an approximate square relationship when the velocity is small. When the incident velocity exceeds a certain limit, the current force and the velocity are in an approximate proportional relationship. A sensitive value is observed for the impact of the relative embankment height on the current force whereby the height has a larger impact on the current force when it is near the sensitive value.

**Keywords:** gear-type mixture embankment; current force over embankment; incident velocity; incident angle; relative embankment height

齿型构件混合堤是长江南京以下深水航道一期工程太仓—南通段采用的一种新型构件混合堤, 工程位置水流涨落潮流速  $1.3\sim1.4\text{ m/s}$ , 涨、落潮流向角分别约  $300^\circ$ 、 $139^\circ$ 。该新型构件混合堤具

有导流、减流、抗浪、挡沙固滩及便于施工等优点<sup>[1-2]</sup>, 但其应用和研究均处于初期阶段, 其结构形式、受力机理与常规的导流堤、止水堰坝或者绕流单体结构物有所不同, 关于齿型构件混合堤

翻坝水流力的计算, 目前没有相关的理论或经验公式, 有待进一步研究。

本文借助 CFX 流体计算软件, 对齿型构件混合堤翻坝水流流场进行数值模拟, 并控制单一变量, 分析入射流速、入射角度、堤高及水深等因素对翻坝水流力的影响, 深入分析齿型构件混合堤在水流作用下的受力机理。

## 1 基本理论

根据《港口工程荷载规范》<sup>[3]</sup>普遍采用的水流力的理论计算公式:

$$F_w = C_w \rho_w A \frac{v^2}{2} \quad (1)$$

$$C_w = C' mn \quad (2)$$

式中:  $F_w$  为水流力标准值 (kN);  $C_w$  为水流阻力系数;  $A$  为计算构件在与流向垂直平面上的投影面积 ( $m^2$ );  $C'$ 、 $m$ 、 $n$  分别为断面形状、水流流向、淹没深度影响系数;  $v$  为水流设计流速 ( $m/s$ );  $\rho_w$  为水密度 ( $t/m^3$ )。

该理论公式为常规的水流力计算公式, 主要适用于计算绕流阻力, 而不适用于翻坝水流力的计算。但通过分析常规水流力计算公式中各参数, 可以初步确定翻坝水流力的影响因素, 即断面形式、入射流速、入射角度以及淹没深度。又结合该齿型构件混合堤的自身特点(混凝土齿型构件混合潜堤), 可发现, 当齿型构件尺寸一定时, 齿型构件的淹没深度由水深条件及构件下方铺设的基床厚度决定, 故定义一个新的影响因子: 相对堤高  $p/h$ (其中  $p$  为堤身高度, 为齿型构件高度  $p_0$  和构件下方铺设的基床厚度  $p_1$  之和,  $h$  为水深), 分析其对翻坝水流力的影响。

## 2 翻坝水流数值分析

### 2.1 模型建立

使用 CFX 软件建立数值水槽, 对齿型构件混合堤翻坝水流力进行三维数值模拟。齿型构件混合堤的三维数值模型、模型尺寸、齿型构件的平面图和立面图分别如图 1~3 所示。

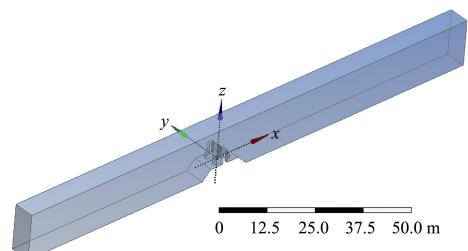


图 1 三维数值模型

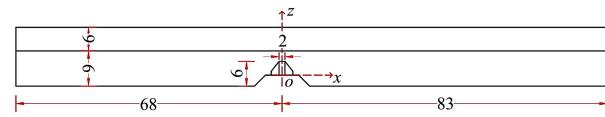
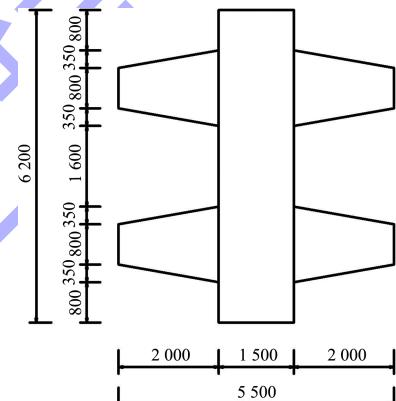
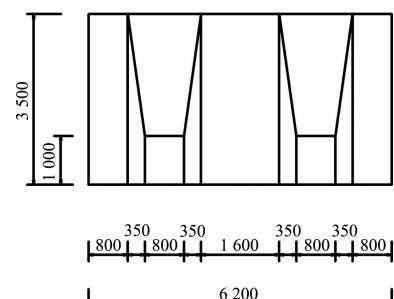


图 2 模型尺寸 (单位: m)



a) 平面图



b) 立体图

图 3 齿型构件 (单位: mm)

### 2.2 边界条件

1) 设置流体入口、出口及顶部空气出口为 Opening 边界; 2) 垂直于堤身轴线方向的流体两侧边界设置为 Symmetry 边界; 3) 模型底部边界设置为 Wall 边界<sup>[4-5]</sup>。模型边界条件设置如图 4 所示。

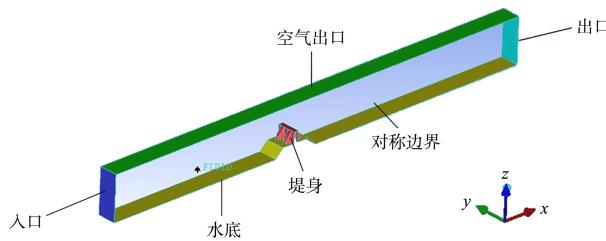
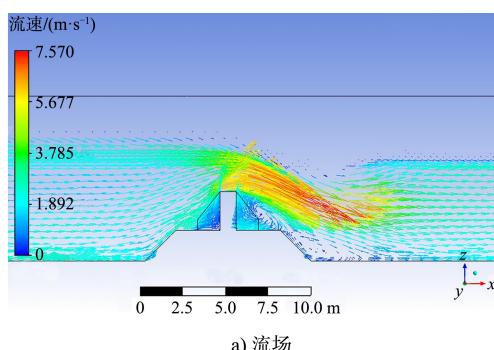


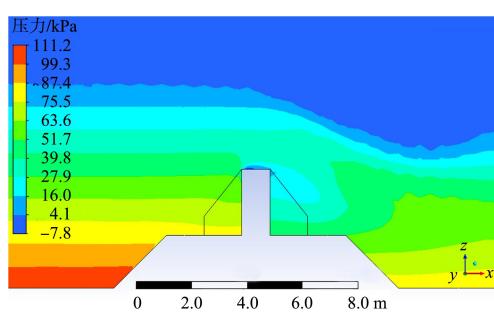
图 4 边界条件

### 2.3 翻坝水流流场及压力场

典型的翻坝水流流场及压力场分布如图 5 所示。



a) 流场



b) 压力场

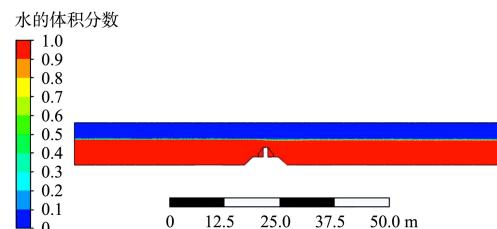
图 5 翻坝水流流场及压力场分布

### 3 翻坝水流力影响因子分析

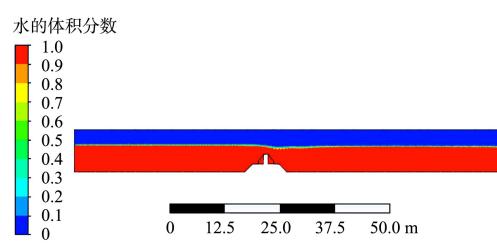
#### 3.1 入射流速

分别针对不同的入射流速 0.5、1.0、1.5、2.0、2.5、3.0、3.5、4.0 m/s, 通过数值模拟, 提取作用在齿型构件上的水流力, 分析不同入射流速对翻坝水流力的影响。

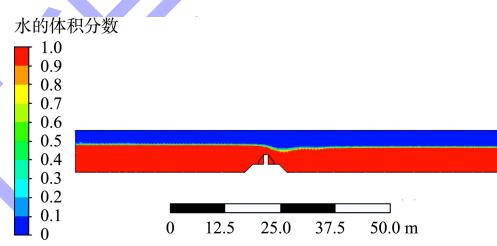
通过流体体积(volume of fluid, VOF)方法, 追踪自由液面的变化过程, 最终达到稳定状态<sup>[6]</sup>, 不同入射流速情况下, 翻坝水流自由液面变化如图 6 所示, 堤身前后自由液面差与入射流速关系曲线如图 7 所示, 作用在齿型构件上的翻坝水流力与入射流速的关系如图 8 所示。



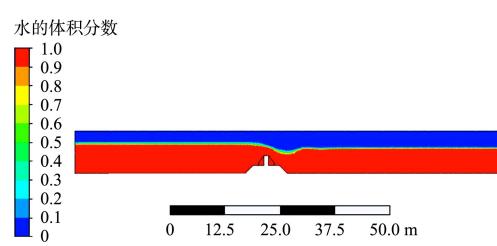
a) 入射流速 0.5 m/s



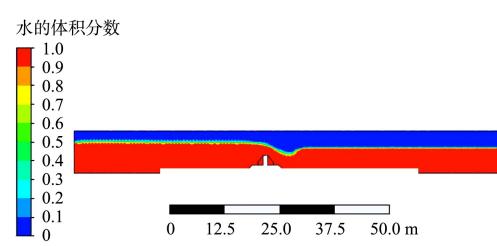
b) 入射流速 1.0 m/s



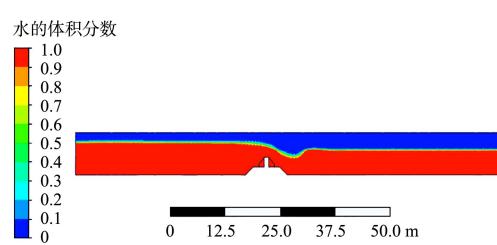
c) 入射流速 1.5 m/s



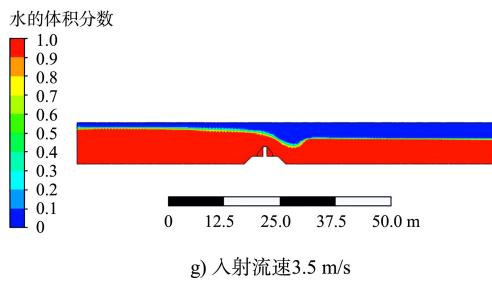
d) 入射流速 2.0 m/s



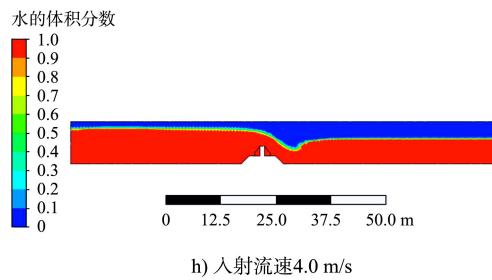
e) 入射流速 2.5 m/s



f) 入射流速 3.0 m/s



g) 入射流速3.5 m/s



h) 入射流速4.0 m/s

图6 不同入射流速翻坝水流自由液面

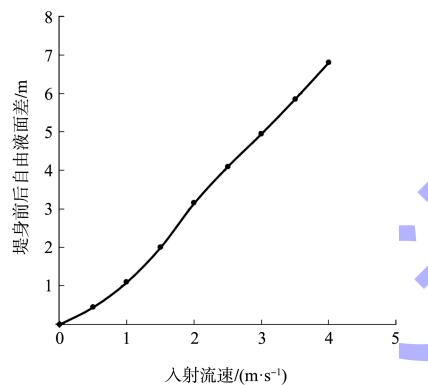


图7 堤身前后自由液面差与入射流速关系曲线

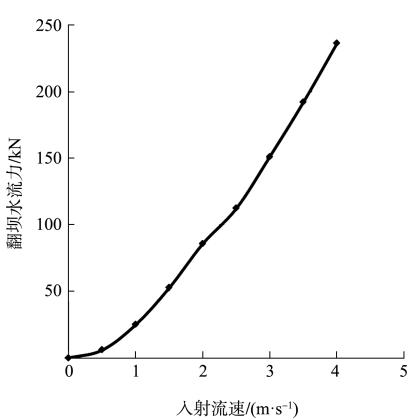


图8 翻坝水流力与入射流速关系曲线

分析翻坝水流自由液面与入射流速的关系曲线, 以及翻坝水流力与入射流速的关系曲线可以发现:

1) 入射流速较小时, 堤前没有明显壅水; 随

着入射流速越来越大, 堤前壅水越高, 堤后水跌越大, 即堤身前后自由液面差越大, 导致作用在齿型构件上的静水压力差也越大。而且当入射流速较小时, 堤身前后自由液面差与入射流速近似成平方关系; 当入射流速超过某一限值(本模型尺度条件下为2 m/s)后, 堤身前后自由液面差与入射流速近似成正比关系。

2) 入射流速越大, 作用在齿型构件上的翻坝水流力越大。入射流速较小时, 翻坝水流力与入射流速近似成平方关系; 当入射流速超过某一限值(本模型尺度条件下为2 m/s)后, 翻坝水流力与入射流速近似成正比关系。

进一步分析可发现, 翻坝水流力由两部分组成: 一部分是水流的动水压力; 另一部分是由于堤身前后自由液面差引起的静水压力。当入射流速比较小时, 堤身前后液面差较小, 翻坝水流力主要是动水压力, 此时, 翻坝水流力和入射流速的关系与常规的水流力计算公式(1)类似, 即水流力与入射流速成平方关系; 随着入射流速逐渐增大, 堤身前后的自由液面差逐渐增大, 导致静水压力差也逐渐增大, 此时翻坝水流力主要由动水压力和堤身前后静水压力差组成, 翻坝水流力与入射流速近似成正比关系。

### 3.2 入射角度

分别针对不同的入射角度0°、15°、30°、45°、60°、75°、90°, 通过数值模拟, 提取作用在齿型构件上的水流力, 分析不同入射角度对翻坝水流力的影响。不同入射角度情况下, 作用在齿型构件上的翻坝水流力与入射角度的关系如图9所示。

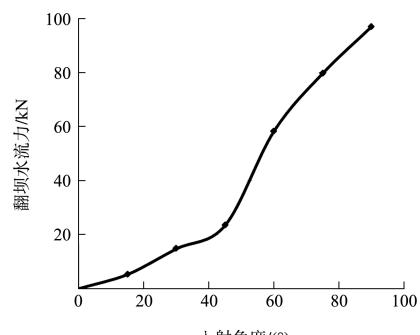


图9 翻坝水流力与入射角度关系曲线

分析翻坝水流力与入射角度的关系可发现, 翻坝水流力随水流入射角度的增大而增大。主要因为入射角度越大, 水流在垂直于堤身轴线方向的速度分量越大, 由 3.1 节分析不难发现, 较大的速度分量最终导致了作用在齿型构件上的动水压力和堤身前后静水压力差也越来越大。

规定  $\alpha$  为水流入射方向与堤身轴线的夹角, 若假定  $\alpha=90^\circ$  时, 入射角度影响系数为 1.0。则各入射角度对应的影响系数见表 1。

表 1 角度影响系数

$\alpha/(^\circ)$	0	15	30	45	60	75	90
$m$	0.00	0.05	0.15	0.24	0.60	0.82	1.00

### 3.3 相对堤高

影响相对堤高的因素有 2 个: 水深  $h$  和堤身高度  $p (=p_0+p_1)$ , 采取控制单一变量法, 分别针对不同的水深  $h$  和基床厚度  $p_1$  进行数值模拟, 分析不同相对堤高对翻坝水流力的影响。

#### 3.3.1 不同水深分析

分别针对不同的水深 6.3、8、9、10、11、12、13、14 m (对应的相对堤高分别为 1.000、0.788、0.700、0.630、0.573、0.525、0.485、0.450), 通过数值模拟, 提取作用在齿型构件上的水流力, 分析水深对翻坝水流力的影响。不同水深情况下, 翻坝水流力与相对堤高的关系见图 10。

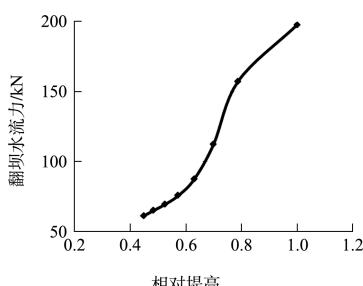


图 10 翻坝水流力与相对堤高(不同水深)关系曲线

#### 3.3.2 不同堤高分析

为了方便对比, 不改变齿型构件的尺寸(即  $p_0$  为定值), 仅通过改变齿型构件下方基床厚度  $p_1$  调整堤高, 分别针对基床厚度 0、0.7、1.4、2.1、2.8、3.5、5.5 m (对应的相对堤高分别为

0.389、0.467、0.544、0.622、0.700、0.778、1.000), 通过数值模拟, 提取作用在齿型构件上的水流力, 分析堤高对翻坝水流力的影响。不同基床厚度情况下, 翻坝水流力与相对堤高的关系如图 11 所示。

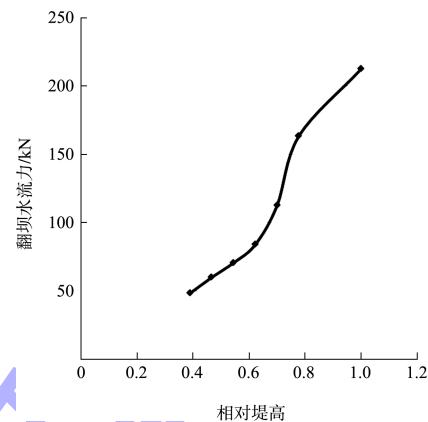


图 11 翻坝水流力与相对堤高(不同基床厚度)关系曲线

综合分析图 10、11 可发现, 无论是改变水深还是改变堤高, 作用在齿型构件上的翻坝水流力随相对堤高的变化趋势类似, 都是随相对堤高的增大而增大; 关系曲线的斜率均是先增大后减小, 相对堤高  $p/h$  在 0.700 附近时, 曲线斜率最大, 即相对堤高在该位置附近变化时, 其对作用在齿型构件上的翻坝水流力影响最大。主要因为相对堤高越大, 有效过流断面积越小, 堤顶流速越大, 作用在堤身上的动水压力越大; 与此同时, 相对堤高越大, 堤身壅水效果越明显, 堤身前后自由液面差越大, 导致堤身两侧的静水压差也越大。

将两条关系曲线绘制于同一坐标系, 见图 12。可发现, 两条关系曲线的变化趋势基本相同, 但不完全重合。 $p/h < 0.70$  时, 两条曲线基本重合, 即表明在本模型尺度下, 相对堤高小于 0.70 时, 改变水深或基床厚度, 对作用在齿型构件上的翻坝水流力的影响效果相当; 当相对堤高  $p/h > 0.70$  时, 基床厚度的变化对翻坝水流力的影响更大, 这主要是因为较厚的抛石基床对水流有明显的挑流作用, 导致作用于齿型构件上的流速较大, 翻坝水流力也更大。

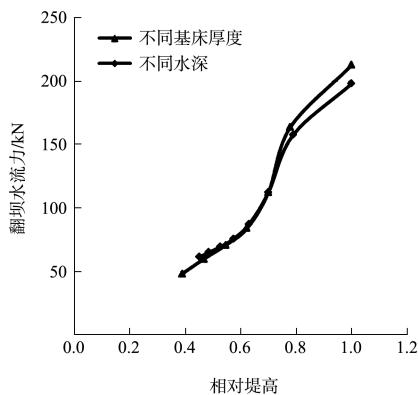


图 12 翻坝水流力与相对堤高关系曲线

#### 4 结语

1) 翻坝水流力既包含水流的动水压力, 也包含堤身前后自由液面差引起的静水压力差。

2) 随着水流入射流速的增大, 作用在齿型构件上的翻坝水流力越大, 当流速较小时, 翻坝水流力与入射流速近似成平方关系, 当流速超过某一限值(本模型尺度条件下约为 2 m/s), 翻坝水流力与入射流速近似成正比关系。

3) 随着水流入射角度的增大, 垂直于堤身轴线方向的速度分量越大, 从而导致作用在齿型构件上的翻坝水流力越大。

4) 随着相对堤高的增大, 作用在齿型构件上的翻坝水流力越大, 且相对堤高对翻坝水流力的

影响有个敏感值(本文模型尺度条件下, 相对堤高的敏感值约为 0.7), 相对堤高在该值附近变化时, 对翻坝水流力的影响最大, 当相对堤高超过该敏感值后, 齿型构件下方的抛石基床对水流有明显的挑流作用, 导致作用于堤身上的流速较大, 翻坝水流力也更大。

#### 参考文献:

- [1] 贝建忠, 孙克刚, 李元音, 等. 基于 CFX 的齿型构件混合堤翻坝水流力分析[J]. 港工技术, 2017, 54(1): 7-11.
- [2] 贝建忠. 齿型构件混合堤翻坝水流流场模拟及水流力影响因素分析[D]. 天津: 天津大学, 2016.
- [3] 中交第一航务工程勘察设计院有限公司, 中交第二航务工程勘察设计院有限公司. 港口工程荷载规范: JTS 144-1—2010[S]. 北京: 人民交通出版社, 2010.
- [4] 杨靖培. 基于 CFX 的波浪水槽数值模拟[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2006.
- [5] SHIN S, LEE W I. Finite element analysis of incompressible viscous flow with moving free surface by selective volume of fluid method [J]. International journal of heat and fluid flow, 2000, 21(2): 197-206.
- [6] 陈为博, 杨敏. 用 VOF 方法数值模拟溢流堰流场[J]. 水利水运工程学报, 2004(4): 42-45.

(本文编辑 王璁)

(上接第 80 页)

4) 本文未对各比选因素进行量化, 在实际选址分析过程中, 也可以根据各比选因素的重要性设置权重系数, 通过打分与权重系数相乘再累加得到每个选址方案的综合得分。

#### 参考文献:

- [1] 葛德杰. 安庆电厂码头选址方案优势比较分析[J]. 水运工程, 2014(10): 76-80.
- [2] 吴峰箭, 刘庆志, 海显盛, 等. 湖南商品车滚装码头项目选址论证[J]. 水运工程, 2014(10): 97-101.

- [3] 杜航. 基于层次分析法的港口选址问题研究[J]. 中国水运(下半月), 2012, 12(4): 32-33, 35.
- [4] 刘堃, 覃杰, 宓宝勇. LNG 码头选址探讨[J]. 水运工程, 2012(7): 77-81.
- [5] 桂劲松. 渔港规划设计与评估方法研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2005.
- [6] 大连水产学院. 渔港总体设计规范: SC/T 9010—2000[S]. 北京: 中国标准出版社, 2001.

(本文编辑 郭雪珍)