



# 水运工程地基CAD软件研发与应用

金晓博<sup>1</sup>, 荣海敏<sup>2</sup>, 刘家才<sup>1</sup>,

(1. 中交第三航务工程勘察设计院有限公司, 上海 200032;

2. 上海易工工程技术服务有限公司, 上海 200131)

**摘要:** 介绍了依据JTS 147-1-2010《港口工程地基规范》研发的“易工水运工程地基CAD软件 V1.0”的主要功能、界面、开发原理和主要模块的算例。软件主要针对水运工程的边坡稳定问题, 考虑了港口工程中常用的地基处理方法, 可模拟软基条件下边坡的分级加载工况, 并具备渗流场计算分析功能。

**关键词:** 水运工程; 边坡稳定; 地基处理; CAD; 软件

中图分类号: O 241; O 332

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2013)10-0249-06

## Development and application of water transport engineering foundation CAD software

JIN Xiao-bo<sup>1</sup>, RONG Hai-min<sup>2</sup>, LIU Jia-cai<sup>1</sup>

(1. CCCC Third Harbor Consultants Co., Ltd., Shanghai 200032, China;

2. Shanghai EasyDoing Engineering Technology Service Co., Ltd., Shanghai 200131, China)

**Abstract:** This paper introduces the main functions, interface, development principle and examples of main modules of EasyDoing Water Transport Engineering Foundation CAD Software V1.0 which is developed according to the *Code for Soil Foundation of Port Engineering*(JTS 147-1-2010). This software is mainly used for water transport engineering slope stability problem, and considers the common foundation treatment methods in port engineering. It can simulate the slope step loading on soft foundation and can calculate and analyze seepage field.

**Key words:** water transport engineering; slope stability; foundation treatment; CAD; software

水运工程的边坡一般位于水域中或水陆交界处, 地表水和地下水对边坡稳定的影响较大, 并且由于水运工程的地基条件通常较差, 边坡建筑如防波堤、护岸等, 时常需要软土加固处理。水运工程的边坡稳定设计应依据JTS 147-1-2010《港口工程地基规范》<sup>[1]</sup>进行, 规范边坡稳定计算方法2010版较1998版的变化较大, 废除了简布法, 增加了复合滑动面法。目前, 国内外已有一些专门用于边坡稳定分析的软件, 但是主要针对建筑、道路、水利等工程。为满足水运工程设计需要, 中交三航院和上海易工工程技术服务有限公司经多年研究, 联合开发了“易工水运工程地

基CAD软件”, 并于2012年6月通过了由中国工程建设标准化协会水运专业委员会组织的交通运输部水运工程应用软件鉴定。

### 1 软件的主要功能

#### 1.1 加固区土体力学指标计算

软件提供了塑料排水板堆载预压法、砂石桩法、水泥搅拌桩法、换填法等常用地基加固方法, 计算加固处理后的土体力学指标。

#### 1.2 模拟边坡构建过程

软土地基采用排水固结法或砂石桩法加固时, 通常要求堤身分级加载, 为保证施工期边坡

收稿日期: 2013-08-10

作者简介: 金晓博(1964—), 男, 教授级高级工程师, 从事港口工程设计、标准编制和科技管理工作。

安全，分级加载的厚度和间歇时间是施工控制的关键参数。用户在提供每一级加载的位置、厚度和时间后，软件能据此建模绘制边坡几何形状，并计算每一级加载时的土体力学指标变化、固结度、沉降和抗力分项系数，可据此调整方案，直到获得满意结果。

### 1.3 沉降、固结计算

沉降计算除基于 $e-p$ 压缩曲线的计算方法外，还提供了基于 $e-lgp$ 曲线以及压缩模量的计算方法，以适应不同设计阶段、不同地质资料情况下的沉降分析。软件对应不同的排水固结条件选择相应的计算公式，能够提供应力固结度和应变固结度两种计算方法。

### 1.4 渗流分析

规范的计算公式采用了替代密度法，即在滑动力矩计算时，低水位以上、零压线以下用饱和密度计算土条重力的标准值；而在抗滑力矩计算时，零压线以下用浮密度计算土条重力的标准值。软件除提供上述计算方法外，还提供了有限单元法边坡渗流分析模块，根据用户提供的土层渗透系数、边界条件及渗流类型、网格长度等控制参数，通过计算可得到零压线、渗流流量、渗流流速、渗透力等结果，并可以直接导入边坡稳

定分析模块中。

### 1.5 边坡稳定计算

软件提供了4种滑面形状模式：直线、圆弧、改进圆弧、非圆弧，并提供了3种计算方法：瑞典条分法、毕肖普法和复合滑动面法；可考虑地震作用和渗流作用，除总应力法外，还提供了有效应力法。软件可以考虑由于后期加载引起的原地基土的固结，还可以考虑抗滑桩、锚杆、土工合成材料等对边坡的加固作用。为了方便用户参考以往的工程经验，软件还提供了选择按照《港口工程地基规范》1998版计算的功能。

## 2 软件的界面设计

软件注重功能性和易用性，提供了图形输入界面，可以显示土层线、高程、水位线、荷载等结构信息和渗透场、滑动面等计算结果，可以对土层线、水位线进行界面绘制和图形编辑操作（图1），直接在图形上选择土层名称和指定加载级数，可以在图形上直接编辑点坐标或拖拽点或线，此外为了便于直接使用原始图形资料，还提供导入AUTOCAD图形并自动形成土层区域功能。这些功能不仅能提高软件的易用性，而且还能及时校验输入数据的正确性，避免错误。



图1 提供图形绘制和编辑工具

## 3 软件的开发原理

### 3.1 土层线

土层线表达方式有连续线法和区域法。在采用连续线法表达土层区域时，上一层需压下一层的土层线。对于简单土层线（图2）的表达，这种方式还是非常方便的，但是对于复杂土层线（图3），这种方式是非常繁琐的，而且有时甚至无法进行表达。若土层局部变动后上下土层线出现相交，则会导致所有的线都要重新进行输入，不适合图形编辑。本软件采用的是区域法，以区域块方式表达土层区域（图4），可以表示任意复杂的区域，包括凹、凸土层区域，且概念清晰，同时

也便于土层局部调整，特别是计算稳定时土条的划分和渗透场计算时网格的划分，是非常方便的。

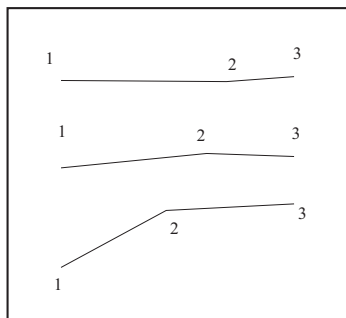


图2 简单土层线

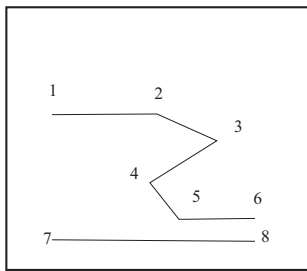


图3 复杂土层线

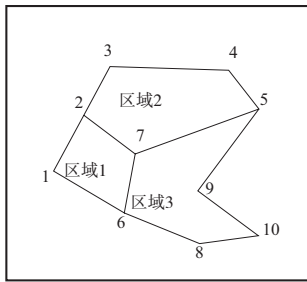


图4 区域法土层线

为了能够编辑土层线, 在进入编辑状态时, 用直线表示区域的轮廓, 提供对直线进行删除、复制、镜像、旋转、列阵等CAD操作命令; 在退出编辑状态时, 自动形成独立的土层区域。该方法也用在AUTOCAD文件导入后的土层识别中。如果在编辑前区域中已设定了土层信息, 在编辑后先计算区域的中心, 从而判定当前区域与编辑前的土层区域的几何关系, 自动设定编辑后的区域土层信息。

为了完整地表达土层形态, 土层区域给出轮廓信息和土层指标信息, 并可设定土层原土和新土属性; 分级加载边坡时需设定土层加载级数(图5)。

### 3.2 土条生成与计算

软件采用极限平衡理论, 其核心是条分法, 整个计算方法都是围绕土条开展的。采用一次性生成土条的方法生成区域中所有的土条, 并在需要计算固结度的区域进行土条竖向细分。该方法与边计算边生成土条的方法相比, 有助于减少计算量、节省计算时间。由于滑面的端点并不在土条与坡面的交点上, 因此这种方法必须对滑面端部两个土条进行局部的处理, 而仅处理端部土条部分工作相对整个滑面土条计算该计算量是微不足道的。

土条的生成与计算可分为3个步骤: 区域网格划分、土条生成和土条信息计算、分级加载信息计算。

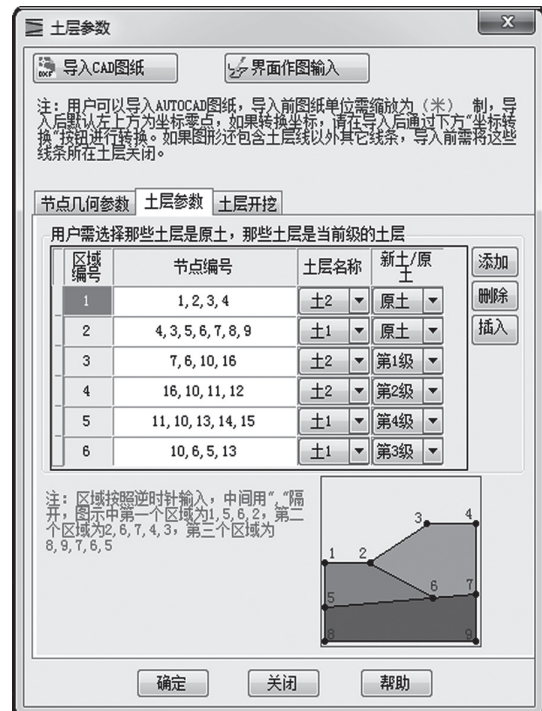


图5 土层参数输入界面

区域网格划分: 首先根据区域点的坐标信息进行三角形划分, 并将所有的区域都变成三角形, 然后通过浸润线对三角形再次剖分, 最终将区域分为水上三角形和水下三角形(图6), 并在每个三角形的划分过程中记录其所在土层信息。

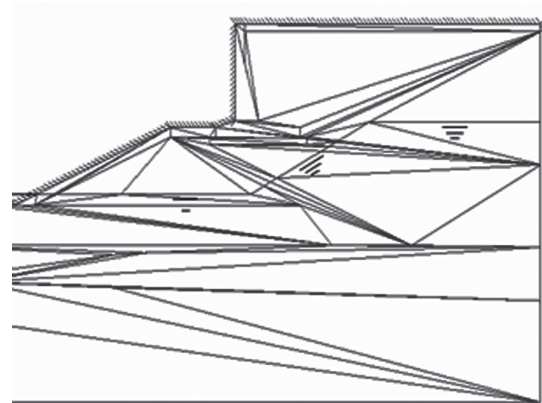


图6 三角划分后的区域

土条生成和土条信息计算: 根据土层线中的特征点和事先设定的土条宽度可以形成一系列土条线, 土条线与三角形相交必然形成一个四边形或三角形, 其中三角形可以认为是退化的四边形, 一个土条将由一系列四边形区域组成, 合并相邻的相同属性的区域并上下排序, 算出每个区域顶部所有区域的累计重力和荷载等信息。在稳

定计算中滑面与土条之间的一些计算问题将转化为滑面与滑面相交区域的计算问题，任意滑面也必将按照下面几种方式与区域相交（图7），将上部区域的累积土量和当前被切割区域相加则得到土条总重。

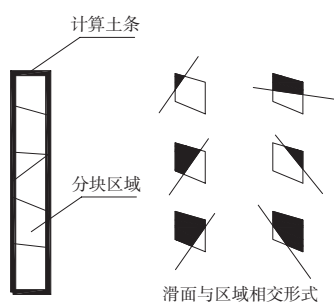


图7 滑面与土条的关系

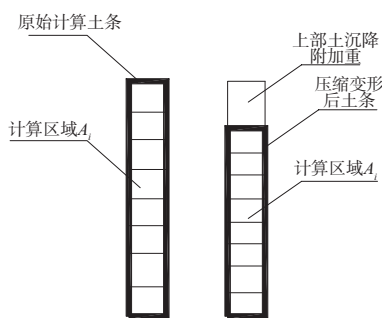


图8 土条压缩

分级加载信息计算：将土条根据指定的高度再进行细分，计算各分块的固结度，并在每级加载后，计算在荷载作用下地基的沉降量（图8），并按当前沉降量修正区域的坐标和因压缩引起的土密度的变化，由于沉降部分引起的附加重力在土条重力计算中也加以考虑，因此变化后的区域密度可以按照式（1）计算：

$$W_i^{\text{压}} = W_i - \rho \frac{(e_{1i} - e_{2i})}{1 + e_{1i}} b h_i \quad (1)$$

式中： $W_i^{\text{压}}$ 为压缩后密度； $W_i$ 为压缩前密度； $\rho$ 为水密度； $e_{1i}$ 、 $e_{2i}$ 为压缩前后孔隙比； $h_i$ 为计算区域高度； $b$ 为土条宽度。

### 3.3 孔隙水压力计算

按照有效应力法计算边坡稳定时，需要知道土条与滑面相交处的孔隙水压力。实测点毕竟为有限点，因此需要通过一个有效的算法来利用有限点反推整个孔隙水压力场。软件参考了在地理

信息中使用的一种方法<sup>[2]</sup>，该方法本身是用在依据有限的高程点来推演区域的曲面中的。若将该方法中的高程换成孔隙水压力，则可以通过已知的 $n$ 个孔隙水压力的采样点，依据式（2）得到拟合函数来计算任意一点的孔隙水压力：

$$u(x,y) = \sum_{i=1}^n A_i \left[ \frac{r_i}{R} \ln \left( \frac{r_i^2}{R^2} \right) + 1 - \frac{r_i^2}{R^2} \right] \quad (2)$$

式中： $u(x,y)$ 是孔隙水压力场函数； $(x,y)$ 为当前点的坐标； $r_i = \sqrt{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2}$ 是与采样点 $i$ 的距离； $R$ 是设定的影响半径； $A_i$ 是已知采样点 $i$ 对当前点的影响系数。

$A_i$ 可以通过式（3）计算。

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nn} \end{bmatrix} \times \begin{Bmatrix} A_1 \\ A_2 \\ \vdots \\ A_n \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ \vdots \\ u_n \end{Bmatrix} \quad (3)$$

其中： $a_{ij} = \left[ \frac{r_{ij}}{R} \ln \left( \frac{r_{ij}^2}{R^2} \right) + 1 - \frac{r_{ij}^2}{R^2} \right]$  (4)

$$r_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} \quad (5)$$

式中： $u_i$ 为采样点的孔隙水压； $(x_i, y_i)$ 是采样点的坐标。

### 3.4 渗流计算

渗透场可以通过式（6）拉普拉斯方程描述<sup>[3]</sup>：

$$k_x \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + k_y \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} = Q(x,y,t) \quad (6)$$

式中： $k_x, k_y$ 是渗透系数； $h$ 为水头。

该方程有各种数值求解方法，本软件采用了有限元法进行求解<sup>[3]</sup>，有限元法可适应复杂边界，并且稳定可靠。按照有限元相关理论推导后，三角形3节点单元的刚度矩阵 $K^e$ 为

$$K^e = \frac{K_x}{4A} \begin{bmatrix} b_i b_i & b_j b_i & b_m b_i \\ b_i b_j & b_j b_j & b_m b_j \\ b_i b_m & b_j b_m & b_m b_m \end{bmatrix} + \frac{K_y}{4A} \begin{bmatrix} c_i c_i & c_j c_i & c_m c_i \\ c_i c_j & c_j c_j & c_m c_j \\ c_i c_m & c_j c_m & c_m c_m \end{bmatrix} \quad (7)$$

其中： $A = \frac{1}{2}(b_i c_j - c_i b_j)$  (8)

$$a_i = x_j y_m - x_m y_j \quad (9)$$

$$b_i = y_j - y_m \quad (10)$$

$$c_i = x_m - x_j \quad (11)$$

角点 $i, j, m$ 的次序为逆时针排序。

建立一个总体方程（12），即可求解所有节

点上的水头:

$$K \times h = F \quad (12)$$

其中:  $K$ 为总体刚度矩阵;  $h$ 是未知水头;  $F$ 为常数。

### 3.5 土坡和地基稳定性验算

土坡和地基稳定性验算依据规范采用了复合滑动面法<sup>[1]</sup>, 适用于圆弧面-平面-圆弧面的复合滑动和单一圆弧面的滑动, 可选用不同形式的滑动面计算, 也适用有软土夹层或倾斜岩面的情况; 对持久状况、短暂状况及各种常用的抗剪强度指标均可应用。

对持久状况, 土的抗剪强度采用固结快剪指标时, 土坡和地基的稳定性按下列公式计算:

$$M_{sd} = \gamma_s [\sum (h_i - z_R)(W_{ki} + q_{ki} b_i) h'_i + M_p] \quad (13)$$

$$M_{Rk} = \sum (h_i - z_R)(1 + g_i) [(W_{aki} + q_{ki} b_i) U_i \tan \varphi_{ki} + W_{bki} \tan \varphi_{ki} + c_{ki} b_i] \quad (14)$$

其中:

$$g_i = -h'_i \frac{x_i - x_R}{h_i - z_R} + \left[ h'_i - F_{\varphi i} + (1 + h'_i F_{\varphi i}) \frac{x_i - x_R}{h_i - z_R} \right] \cdot \frac{2h'_i - F_{\varphi i} + h_i^2 F_{\varphi i}}{(1 + F_{\varphi i}^2)(1 + h_i^2)} \quad (15)$$

$$F_{\varphi i} = \tan \varphi_{ki} / \gamma_R \quad (16)$$

式中:  $h'_i$ 为土条中点处滑面的一阶导数。对其它设计状况的计算方法, 规范<sup>[1]</sup>中也有详细的介绍。

## 4 算例

某陆域形成工程围堤, 采用袋装砂斜坡堤结构(图9), 地基处理采用塑料排水板排水固结法。

### 1) 设计条件。

设计水位: 设计高水位(20 a一遇) 4.79 m; 设计低水位(20 a一遇) -3.41 m。

地质条件: 围堤位于滩涂地带, 表层为③<sub>1</sub>层淤泥夹粉砂、粉土, 厚8.4 m, 其物理力学指标:  $\rho=1.65 \text{ g/cm}^3$ , 快剪:  $C=5.2 \text{ kPa}$ ,  $\varphi=4.9^\circ$ , 固快:  $C=6.9 \text{ kPa}$ ,  $\varphi=9.7^\circ$ ; ③<sub>2</sub>层淤泥, 厚16.9 m, 物理力学指标: 快剪:  $C=6.5 \text{ kPa}$ ,  $\varphi=4.2^\circ$ , 固快:  $C=8.8 \text{ kPa}$ ,  $\varphi=9.5^\circ$ ; ④<sub>1</sub>层淤泥质粉质黏土, 顶板高程-25.3 m, 层厚3.50~7.00 m, 物理力学指标:  $\rho=1.74 \text{ g/cm}^3$ , 快剪:  $C=9.8 \text{ kPa}$ ,  $\varphi=6.9^\circ$ , 固快:

$C=10.6 \text{ kPa}$ ,  $\varphi=10.7^\circ$ , 其下为老黏土层。

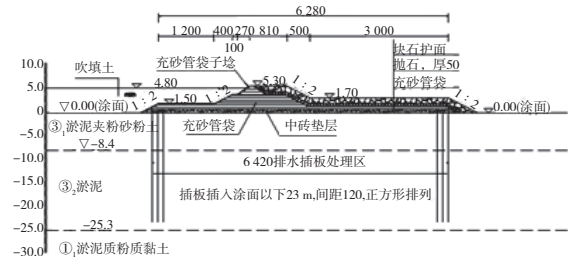


图9 某陆域形成围堤断面

### 2) 地基稳定性验算。

根据规范分别对短暂状况和持久状况进行整体性验算。

短暂状况: 堤身至5.3 m高程, 后方吹填至4.8 m, 边坡内水位取吹填高程4.8 m, 外水位取涂面高程0.0 m。因土质较差, 围堤分3级建成, 吹填分2级完成, 考虑塑料排水板打设范围内土体的强度增长。第1级至1.5 m, 施工过程1个月, 间歇1个月; 第2级至3.5 m, 施工过程1个月; 第3级荷载为后方吹填, 吹填至3.0 m, 历时2个月; 第4级堤身施工至5.3 m, 施工过程1个月, 间歇1个月; 第5级吹填至4.8 m。考虑吹填过程中渗流作用对地基稳定性的影响, 计算采用瑞典条分法进行, 地基土指标采用快剪指标。图10为分级加载过程的整体稳定计算结果, 图11为后方吹填至4.8 m的渗流场。

持久状况: 土的抗剪强度采用固快指标, 坡内地下水位高程4.3 m, 坡外水位采用0.0 m(图12)。

| 级数 | 起始时间 t1 (月) | 终止时间 t2 (月) | 施工荷载 x1 (m) | 施工荷载 x2 (m) | 施工荷载 (kPa) | 浸润线参数 | 最小安全系数 | 是否计算 |
|----|-------------|-------------|-------------|-------------|------------|-------|--------|------|
| 1  | 0           | 1           | 0           | 0           | 0          | 浸润线   | 1.6017 | 立即计算 |
| 2  | 2           | 3           | 0           | 0           | 0          | 浸润线   | 1.1228 | 立即计算 |
| 3  | 3           | 5           | 0           | 0           | 0          | 浸润线   | 1.0379 | 立即计算 |
| 4  | 5           | 6           | 0           | 0           | 0          | 浸润线   | 1.104  | 立即计算 |
| 5  | 7           | 9           | 0           | 0           | 0          | 浸润线   | 1.1337 | 立即计算 |

图10 分级加载过程的整体稳定计算结果

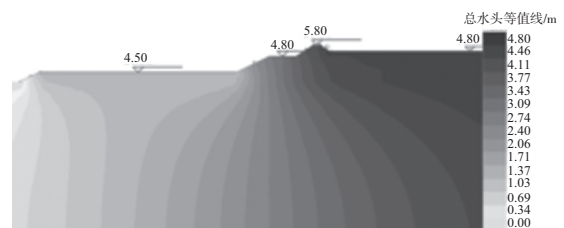


图11 吹填至4.8 m时的渗流场

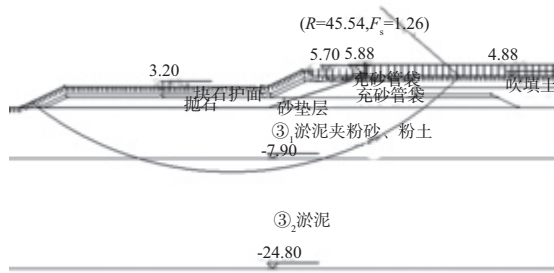


图12 使用期围堤整体稳定性分析

### 5 结语

1) 土层线的表达方式采用区域法, 便于土条和渗透场网格的划分, 并提供图形直接编辑功能方便用户创建和修改土层; 采用一次性生成计算区域中所有土条的方法, 提高了计算效率。

2) 软件参考在地理信息中使用的方法, 利用有限点反推整个孔隙水压力场; 软件渗流场计算

采用有限元法, 可适应更复杂的边界条件。

3) 土坡和地基稳定性验算采用了复合滑动面法, 适用性更强。

4) 软件可模拟软基条件下边坡的分级加载工况, 在模拟施工分级加载过程中同时考虑了分级加载时土体固结度增长和由于沉降引起的回填重力增加因素。

### 参考文献:

- [1] JTS 147-1—2010 港口工程地基规范[S].
- [2] 白世伟, 贺怀建, 王纯祥. 三维地层信息系统和岩土工程信息化[J]. 华中科技大学学报: 城市科学版, 2002, 19 (1): 24-26.
- [3] 钱家欢, 殷宗泽. 土工原理与计算[M]. 北京: 水利电力出版社, 1996.

( 本文编辑 武亚庆 )



## · 消 息 ·

### 交通运输部将建综合运输标准体系

日前, 交通运输部办公厅印发《关于加强交通运输标准化工作的意见》( 简称《意见》), 提出到2020年, 基本形成覆盖交通运输各领域的标准体系, 交通运输标准管理机制更加完善, 标准化发展能力显著提高, 标准质量和实施效果明显提升, 标准化对交通运输发展的技术支撑和基础保障作用进一步显现, 适应交通运输转型发展的需要。

《意见》在完善标准化管理体制方面提出, 要强化政府对标准化的主导作用, 各级交通运输主管部门要在政策法规制定、标准体系建设、标准信息公开等方面做好统筹指导工作; 要充分发挥企业在标准研制和应用中的主体作用, 鼓励行业协会、学会发挥桥梁纽带作用; 要加强组织领导, 抓紧制定相关制度政策; 要建立行业标准化管理部门与业务管理部门、行业协会、企业等利益相关方的协调沟通机制; 要完善标准立项和审查机制, 提高立项的科学性和公正性, 完善标准审查和发布机制; 要促进标准化与科技创新紧密结合, 加强科技项目和标准项目立项的协调。

《意见》明确了十项交通运输标准化重点工作: 1) 统筹规划交通运输标准体系; 2) 建立综合运输标准体系; 3) 建立绿色交通标准体系; 4) 完善交通运输服务标准体系; 5) 加快重点领域标准制修订; 6) 加强标准实施监督管理; 7) 积极参与国际标准化活动; 8) 强化信息化建设; 9) 促进能力建设; 10) 积极筹措经费。

摘编自《中国交通报》