

DOI :10.3876/j.issn.1000-1980.2009.02.018

曲线形钢索塔立式匹配精度控制技术

蒋敏卫,李桂华

(河海大学土木工程学院,江苏 南京 210098)

摘要:以曲线型钢索塔桥梁——南京长江第三大桥为例,针对钢索塔立式匹配过程中的线形控制问题,引用精度控制的概念,建立了相应的精度控制系统,阐述了精度控制的作业内容、工作流程和控制方法,着重对塔柱参照系的确定、塔柱高度误差累计控制、塔柱轴线累计偏移控制、塔柱累计扭转控制等内容进行了研究.以精度控制结果为依据,给出了钢索塔节段制作和立式匹配的実施原则和方法.

关键词:立式匹配 精度控制 钢索塔 累计误差

中图分类号: U442.4

文献标识码: A

文章编号: 1000-1980(2009)02-0211-06

随着我国交通事业的发展,各种新型特大桥梁相继出现.南京长江第三大桥是我国也是世界上已建成的首座曲线形钢索塔钢箱梁斜拉桥^[1](国际上已有 A 形和倒 Y 形等钢索塔桥梁).与混凝土索塔相比,钢索塔具有工厂化加工、体积小、自重轻、施工进度快、外形美观、环保等特点,它在日本、美国及欧洲各国得到了广泛应用.南京长江第三大桥的钢索塔呈‘人’形(见图 1),1 个索塔有 2 个塔柱组成,每个塔柱由 21 个节段组成.建设这样一座新颖美观的大桥需要解决一系列技术难题,其中,钢索塔的加工和立式匹配中的线形控制是技术难题之一.

立式匹配即钢索塔两相邻节段的立式预拼,是相对于水平预拼而言的,其作业不是在施工现场而是在工厂内完成.钢索塔各节段在工厂机加工完成后,需要进行相邻两节段间的立式匹配,目的是为了检验节段间接口的匹配、金属接触率、端面垂直度(即轴线与端面的夹角)和塔柱曲线度,同时标定出用于桥位现场拼装的测控特征点和控制轴线,并进行空间坐标测量.所获得的空间坐标和控制轴线,是指导桥位实地塔柱拼装施工的主要依据.因此,钢索塔立式匹配是桥梁施工的关键工序之一,其质量控制直接关系到桥梁的最终质量^[2].

线形控制是节段立式匹配控制的主要内容之一.曲线形索塔的线形控制相比直线形索塔来说,技术要求更高,难度更大.其原因有:(a)由于曲线形索塔在加工制造时不仅要考虑构件的垂直和线性关系,而且要考虑弧度和非线性关系;(b)曲线形索塔的应力计算和控制更复杂;(c)索塔节段的制造、匹配和安装等各工序相对比较复杂,曲线形索塔的节段不能一次性全部加工完成,而是需要等前面节段匹配完成后,才能进行下一节段的制造^[3].

本文以南京长江第三大桥为工程实例,对曲线形钢索塔立式匹配中的线形控制这一技术难题进行了研究,引用精度控制^[4-5]的概念,给出了精度控制的方法.

1 精度控制的概念

钢索塔的线形控制是一个动态的过程,它贯穿于节段的制作、匹配和安装等各个阶段,但各个阶段的重



图 1 钢索塔现场施工

Fig. 1 Construction site
of curved steel pylons

要性并不一样.南京长江第三大桥整个塔柱高 215 m,仅设 3 道调整口,所以,塔柱线形在桥位安装时的调整余地很小.钢索塔节段间主要靠金属接触进行传力,塔柱线形实际上在节段加工完成时已基本确定.而一个节段的制作需要根据前面节段的立式匹配情况进行调整,所以,塔柱的线形控制主要在节段的制作和匹配的动态过程中进行,线形精度控制过程主要是针对节段的制作和匹配过程.

精度控制在很多领域得到了应用.钢索塔立式匹配的精度控制是指根据钢索塔单节段的长度、端面垂直度及两节段的立式匹配壁板轴线间错移等项目的测量结果,利用计算机进行塔柱的仿真预拼,预测塔柱的安装误差,并以预测结果指导节段的加工和两节段的立式匹配作业,实现对钢索塔制作和安装精度的控制^[6-7].精度控制的内容包括:(a)塔柱累计高度控制^[8]; (b)塔柱累计轴线偏移控制; (c)塔柱累计扭转控制; (d)用累计结果指导单节段的加工; (e)用累计结果指导两节段的匹配.

2 精度控制系统

2.1 系统流程

根据南京长江第三大桥钢索塔线形控制的实际需要,研究建立了一套精度控制系统.该系统不仅能在钢索塔节段制造过程中动态预显已加工节段预拼线形的偏差情况,而且能及时准确反馈修正信息,指导未加工节段的加工和匹配,实现对塔柱预拼线形、高度及扭转的主动控制.该系统的流程见图 2.

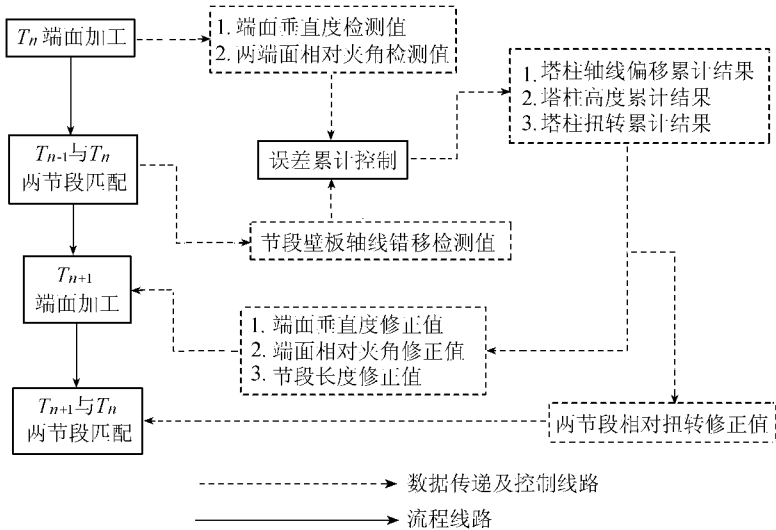


Fig. 2 Flow chart of accuracy control system

需要指出的是,精度控制系统是建立在假设状态下的,其假设状态包括:(a)无应力假设.钢索塔的精度控制是控制钢索塔在无应力状态下的精度.(b)刚体假设.在精度控制中假设节段均为刚性体,不考虑实际节段在平放和立放状态下的形态变化.虽然在实际情况下,钢索塔是存在应力和形态变化的,但这些因素引起的误差很小,可以忽略不计.

2.2 参照系的确定

钢索塔的线形控制主要通过对轴线的控制来实现,而钢索塔的轴线在实际施工中是不可见的.所以用轴心面(经过节段的中心轴线并且垂直于节段壁板的 2 个平面)将不可见的空间节段轴线转换到节段的 4 个壁板上(即轴心面与壁板的交线),代表节段的空间轴线(图 3).壁板轴线不仅含有节段轴线的空间位置信息,而且还含有节段横桥向和纵桥向的定位信息.通过对壁板轴线转移和扭转的控制,实现对钢索塔预拼线形精度的控制.

精度控制首先要确定参考系.针对南京长江第三大桥,规定钢索塔系统坐标系(图 4) x 轴指向北, y 轴指向下游,对每个塔柱在岸侧、江侧、内侧 3 个方向的壁板轴线进行控制.规定节段横桥向端面垂直度以绕 x 轴逆时针方向为正(沿 x 轴反方向)纵桥向端面垂直度以绕 y 轴逆时针方向为正(沿 y 轴反方向)错台以偏向 x (或 y) 正轴为正,负轴为负.累计控制结果中累计角度偏差横桥正值即绕 x 轴逆时针(沿 x 轴反方向),纵桥正值即绕 y 轴逆时针(沿 y 轴反方向)累计轴线偏差横桥正值即偏向 y 轴正向,纵桥正值即偏向 x 轴正向.

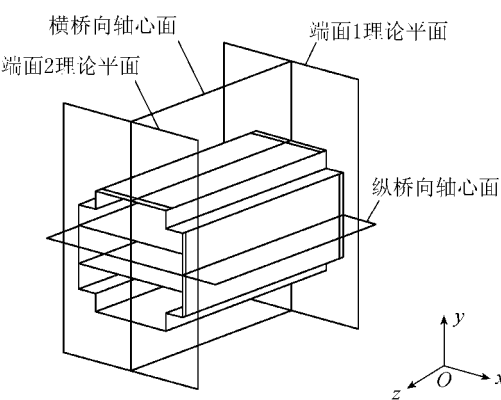


图 3 用轴心面将节段轴线转换到壁板

Fig. 3 Transforming axial wires into axial lines on sidings

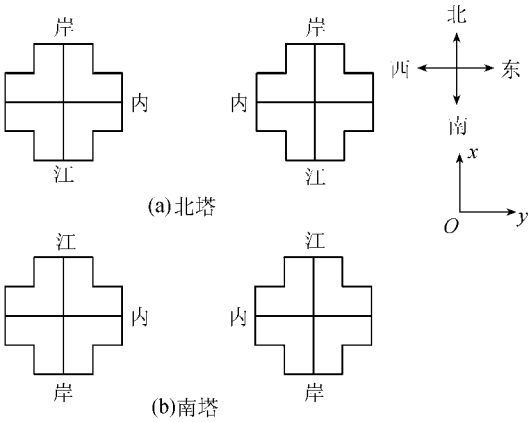


图 4 塔柱坐标系

Fig. 4 Reference system for pylons

3 精度控制方法

3.1 塔柱高度误差累计控制

在每个节段的内外壁板两边测量节段长度,比较 4 个测量值与无应力状态下该位置的设计理论值,求出误差值.将 4 个误差值求平均,代表该节段的长度误差值.用该长度误差值来进行塔柱高度的误差累计控制,并用累计控制结果在端面加工时控制后续节段的长度.塔柱高度的误差累计控制目标是使每个塔的两塔柱高程差趋于零,同时控制整个塔的高程误差.

节段长度用钢尺测量,测量时的温度控制条件与机加工时的要求相同或相近.即在长度测量过程中壁板温差小于 2℃;长度测量前后环境温度变化小于 2℃,环境与节段的温差小于 2℃.要求同一塔的两个塔柱的各节段用同一把钢尺测量,严格按照钢尺操作测量规程施加拉力,并对测量结果进行修正.考虑人为读数误差,要求测量中同一塔两塔柱的各节段为同一组操作人员测量,以有效减小误差.

3.2 塔柱轴线累计偏移控制

3.2.1 轴线的设定

用 TrackerII 型精密激光跟踪测量系统 (precision automatic tracking system, PATS)^[9] 对梁段端面轮廓上的角部特征点 (角点)、轴线点及壁板上的 3 个激光靶标进行空间测量,如图 5 所示,图 5 中各角点处的三角标记表示测点,圆点表示激光靶标,壁板中点处的三角标记为划轴线测点.测量完成后在计算机中用测量数据构造钢索塔实际节段的空间数据模型 MS (图 6).根据设计图纸,在计算机中利用节段端面角点的理论数据构造理论节段的数据模型 ML.利用计算机程序将理论节段数据模型与实际节段数据模型进行最小二乘拟合下的坐标转换,归一化到设计坐标系中.最小二乘拟合需要满足下列条件:

$$\min \left(\sum_{i=1}^{20} dx^2 \right) = f_1(x, y, z, \theta_x, \theta_y, \theta_z) \tag{1}$$

$$\min \left(\sum_{i=1}^{20} dz^2 \right) = f_3(x, y, z, \theta_x, \theta_y, \theta_z) \tag{2}$$

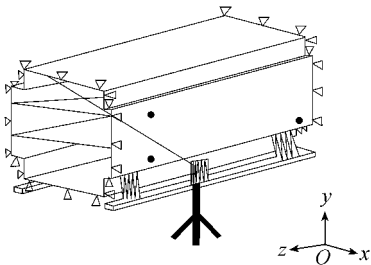


图 5 用 PAIS 进行空间测量

Fig. 5 Spatial survey using PATS

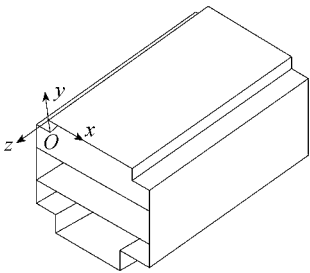


图 6 节段的空间数据模型

Fig. 6 Spatial data model of a segment

$$\min\left(\sum_{i=1}^{20} dz^2\right) = f_3(x, y, z, \theta_x, \theta_y, \theta_z) \tag{3}$$

式中： $x, y, z, \theta_x, \theta_y, \theta_z$ ——钢索塔实际节段的空间数据模型在坐标系中的位置姿态转换参数； i ——节段一端的测点数。用最佳拟合状态下理论模型的轴心面作为节段体加工的工艺基准。

求出最佳拟合状态下钢索塔实体上 3 个激光靶标与理论体 2 个轴心面的空间位置关系，在机加工过程中将激光靶标作为找正和测量基准。同时求出最佳拟合状态下理论体模型的轴心面与壁板交线上的 a, b 2 点与划线定位工装的相对位置参数，并借助划线定位工装在壁板上划出 a, b 2 点， a, b 连线即为后续匹配测量的工艺基准。

预拼装时钢索塔轴心空间位置的控制可转换成对壁板轴线的控制(图 7)。如果预拼装 T_n 节段，轴心在 x, y, z 轴方向的位置控制通过对 $T_1 \sim T_{n-1}$ 节段预拼高度累计偏差的控制及对壁板和轴线端点 a, a', b, b', c, c' 偏移的累计控制来完成。轴心在纵桥向的偏转控制通过控制壁板轴线 bb' 端点相对于塔柱轴线在 y 向的偏移值完成。轴心在横桥向的偏转控制则通过控制壁板轴线 aa' 端点相对于塔柱轴线在 x 向的偏移值完成，如图 8 所示。

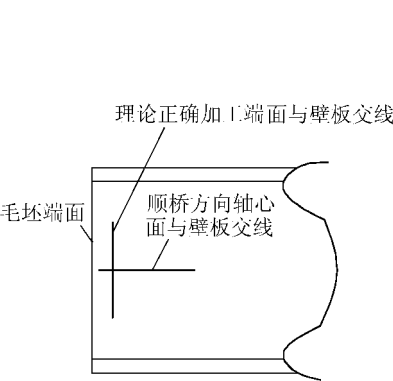


图 7 轴心空间位置转换成壁板轴线

Fig. 7 Transforming of axial lines on sidings

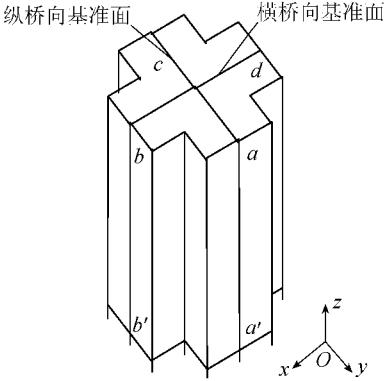


图 8 纵桥向和横桥向的基准面

Fig. 8 Longitudinal and horizontal datum planes

3.2.2 轴线偏差计算方法

轴线偏差^[10]产生的因素有 3 个：(a)单节段下端面相对于轴线的垂直度误差 θ_i ；(b)单节段上下两端面的相对夹角误差 a_n ；(c)两节段立式匹配预拼装时壁板轴线的相对错位 δ_i 。因此，轴线偏移值由 θ_i, a_n, δ_i 组成。设 x_i, σ_i, δ_i 分别为以上 3 个因素引起的误差，则

$$x_i = L_i \sin \theta_i \tag{4}$$

$$\sigma_i = L_i \sum_{n=1}^{i-1} a_n \tag{5}$$

式中 L_i 为节段长度。 δ_i 主要是由两节段立式匹配时壁板错边量的调整及划线误差造成的，它可以通过测量相邻上下两节段接触端面处轴线的相对偏移值直接获得。

综上所述，钢索塔第 i 节段的壁板轴线偏移值 X_i 为

$$X_i = x_{i-1} + x_i + \delta_i + \sigma_i = x_{i-1} + L_i \sin \theta_i + \delta_i + L_i \sum_{n=2}^i a_n \tag{6}$$

3.3 塔柱累计扭转控制

由于单节段钢结构制作中存在扭曲误差，而在匹配中又要保证节段间壁板的错边最小，造成塔柱相邻节段产生了扭转。实际上，对壁板轴线端点 a, a', b, b', c, c' 偏移的累计控制完全包含了塔柱节段扭转控制的内容。

扭转控制主要是要确定扭转值，扭转值通过轴线累计偏移控制结果得到。在轴线累计偏移控制中，江岸两侧壁板轴线控制结果差值的 $1/2$ 即为该塔柱累计到此节段的扭转值。设 W_i 为第 i 节段的扭转值，则

$$W_i = \frac{X_{i江} - X_{i岸}}{2} \tag{7}$$

式中: $X_{i江}$ ——轴线累计偏移控制结果中江侧壁板轴线控制的偏移结果; $X_{i岸}$ ——轴线累计偏移控制结果中岸侧壁板轴线控制的偏移结果。 W_i 的正负规定:以上节段相对下节段产生逆时针方向的扭转为正,产生顺时针方向的扭转为负。

3.4 用误差控制结果指导单节段的加工

节段的修正加工包括塔柱高度偏差的修正加工、轴线偏移的修正加工、节段间扭转的修正加工。其中高度的修正加工量,从高度的累计偏差控制结果得到,轴线扭转的修正量从轴线累计偏移控制分析计算得到,而扭转偏差只能以扭转形式在两节段的立式匹配中修正。

塔柱高度修正以同一塔两塔柱高差归零为目标,按照高度误差累计控制结果,在节段长度符合要求的限定条件下,控制同一塔两塔柱的节段长度偏差趋势,使两塔柱高差归零。塔柱轴线偏差修正以轴线偏移值及角度累计偏差(即由单节段上下两端面夹角误差引起的偏差)归零为目标,它是累计误差控制指导节段加工修正中最关键的部分,通过控制下端面垂直度、两端面整体夹角来控制轴线偏移和理论夹角累计偏差的修正。轴线偏差修正必须满足 3 个限定条件:(a)单节段端面垂直度不大于 $20''$ ($1/10\,000$);(b)单节段横桥向端面夹角不大于 $32''$;(c)单节段纵桥向端面夹角不大于 $25''$ 。当轴线偏移较小,角度累计误差不大时,在上述 3 个限定条件下,有可能仅通过对一个节段的修正就能将轴线偏差修正到理论位置。当轴线偏移较大或角度累计误差较大时,则在满足上述 3 个限定条件的前提下,应提前研究修正加工方案,合理预设后续多个节段的加工修正值。同时考虑加工误差,监控后续多个节段的修正结果,及时调整原预设加工修正量,最终达到理想修正结果。

3.5 用误差控制结果指导两节段间的匹配

匹配的原则是,以机加工完成后最终整体检测时所划的轴线为依据,长轴为主,同时兼顾壁板错边量进行立式匹配的对位。壁板轴线的扭转量可以通过累计误差控制结果分析得到,而且轴线的扭转不能通过端面加工来控制,只有在下一次立式匹配中通过轴线的扭转进行修正。由于立式匹配需要考虑的另一个主要指标是壁板的错台,所以当轴线的扭转在限定范围内时,立式匹配作业中仍以保证壁板的错边量为主。仅当轴线扭转超出限定条件,或轴线扭转出现系统性偏差时必须进行修正,此时可能会在一定范围内增大错台量。

以 T_n 和 T_{n+1} 的立式匹配为例,说明节段吊装对位的过程。首先将 T_n 节段在橡胶池内立起后,利用门吊将其平稳地吊至匹配胎架上,再将腹板上的单侧拼接板及所有纵肋单侧拼接板吊至节段隔板上的相应位置,以便于进行后继的拼接板投孔作业。在 T_n 节段的上端口靠近切角部位安装 8 个对正工装。将 T_{n+1} 节段吊至 T_n 节段之上,与 T_n 节段进行立式匹配,两个节段吊装时上端口均朝上,且岸、江侧均一致。利用对正工装调整 T_{n+1} 节段,使其下端口与 T_n 节段上端口对准。对准原则如下:(a)按照精度控制系统给出的扭转控制值调整两节段相邻端口纵桥向轴线错位关系,同时均分横桥向轴线对齐误差。(b)对位时同时考虑错边量,现场作业时保证纵横轴线偏移量 $\lambda \leq 0.8\text{ mm}$ 。对于角点及纵肋、腹板根部错边量进行如下处理:当错边量 $\Delta \leq 1\text{ mm}$ 时不作处理;当 $1\text{ mm} \leq \Delta \leq 3\text{ mm}$ 时按 1:10 过渡坡口打磨处理。两节段准确对位后,拆除对正工装。在两节段接口 4 个切角部位划对位线(壁板内外侧均划线),具体位置是角壁板外边缘向内 80 mm。对位线长 200 mm 并打扬冲眼。

4 结 语

南京长江第三大桥是世界上首座曲线形钢索塔桥梁,其线形控制是要解决的技术难题之一。本文针对钢索塔节段立式匹配和制作过程中的高度、轴线和扭角等 3 个方面的线形控制问题,给出了每一项控制的具体方法和需要注意的关键点,引用了精度控制的概念,建立了针对南京长江第三大桥的精度控制系统,详细阐述了精度控制的作业内容、工作流程和控制方法,并就如何利用误差控制结果进行节段的制作和匹配给出了实施原则和方法。

本文的研究成果在南京长江第三大桥的建造过程中得到应用,验收结果表明,裸塔(不拉索时的钢塔)的垂直度不大于 $1/4\,000$,达到了设计要求,因此,采用的技术方法是可靠实用的。

参考文献:

[1] 黄腾,蒋敏卫. 钢索塔建造中精密测控技术研究及应用[R]. 南京:河海大学,2006:1-2.

- [2] 王永. 崖门大桥索塔施工测量[J]. 公路, 2006(12): 10-13.
- [3] 黄腾, 金明, 高波, 等. 南京长江二桥北汊主桥施工的线形控制研究[J]. 工程勘察, 2003(6): 57-59.
- [4] 向中富. 桥梁施工控制技术[M]. 北京: 人民交通出版社, 2001: 118-120.
- [5] 秦顺全. 桥梁施工控制[M]. 北京: 人民交通出版社, 2007: 23-25.
- [6] 吴栋材, 李宝贵, 黄声享, 等. 武汉长江公路桥高塔墩施工测量[J]. 城市勘测, 1995(3): 13-18.
- [7] 黄张裕, 赵仲, 黄腾, 等. 南京长江二桥南汊桥高塔柱施工测量[J]. 江苏测绘, 2000, 23(1): 19-22.
- [8] 李昆. 特大型桥梁施工的三角高程控制测量[J]. 长沙电力学院学报, 2005(3): 88-91.
- [9] 夏桂云. 大跨度桥梁结构计算理论[M]. 北京: 人民交通出版社, 2002: 75-86.
- [10] 华锡生, 黄腾. 精密工程测量技术及其应用[M]. 南京: 河海大学出版社, 2002: 247-270.

Accuracy control techniques of vertical matching for curved steel pylons

JIANG Min-wei, LI Gui-hua

(College of Civil Engineering of Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: The No. 3 Nanjing Yangtze River Bridge, a bridge with curved steel pylons, was used as an example. With regard to the line type control used during the vertical matching of the steel pylons, the concept of accuracy control was introduced to establish the relevant accuracy control system. The content, procedure and control techniques of the accuracy control are discussed, and the following aspects are highlighted: determination of the reference system, accumulated error control of the height, accumulated deflection control of the axis, and accumulated distortion control for the pylons. Based on the test results of accuracy control, the principles and methods of vertical matching and manufacturing of the pylons are put forward.

Key words: vertical matching; accuracy control; steel pylon; accumulated error

《水利经济》征订启事

中国科技核心期刊 全国水利系统优秀期刊 全国农业系统优秀期刊

(邮发代号 28-252, CN32-1165/F, 双月刊)

《水利经济》是河海大学与中国水利经济研究会共同主办的以技术性为主、兼顾学术性和管理性的科技期刊。《水利经济》1983年创刊,是全国唯一的水利经济研究方面的专业性期刊。经国家科委批准,国内外公开发行。

主要刊登内容 水利经济学理论 水利工程建设中的经济效益、社会效益和环境效益评价与分析,水利工程经济评价和财务评价,以及水利工程资本运作与费用分摊研究 水利工程管理研究,以及水利事业和水利建设的管理体制体制改革研究 水库移民经济研究 农业经济研究 生态与环境经济研究,生态建设领域中的水资源可持续发展研究等。

主要读者对象 从事水利经济、水利水电技术、经济管理、生态、环境、农业经济及管理工作的有关工程技术人员、科研人员、管理人员以及高等院校师生。

订阅办法 读者可通过邮局订阅,也可直接汇款至编辑部订阅。每期定价6元,全年6期共计36元。

编辑部地址 210098 南京市西康路1号 河海大学《水利经济》编辑部

联系电话/传真 (025) 83786350

E-mail jj@hhu.edu.cn

网址 http://kkb.hhu.edu.cn/index_jj.htm