引文格式:李冠青,黄声享,郑南山,等.基于灰色综合评价的大型工程控制网布测设计[J].武汉大学学报(信息科学版),2026,51(2):306-315.DOI:10.13203/j.whugis20230464

Citation: LI Guanqing, HUANG Shengxiang, ZHENG Nanshan, et al. Control Network Design of Megaproject Based on Grey Comprehensive Evaluation[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2026, 51(2): 306-315. DOI: 10.13203/j.whugis20230464

基于灰色综合评价的大型工程控制网布测设计

李冠青[1] 黄声享[2] 郑南山[1] 赵东升[1] 张克非[1]

1 中国矿业大学环境与测绘学院,江苏 徐州,221116

2 武汉大学测绘学院,湖北 武汉,430079

摘 要:控制网布测方案设计是实现测量精度、可靠性和费用等质量指标综合优化的关键环节,也是保障工程质量的前提。利用层次分析法进行工程控制网布测方案设计需要有明确的定量评价数据及各因素之间的比较判断矩阵。然而,在控制网布测方案设计阶段,往往难以准确获取完整的评价数据。针对上述问题,提出了一种基于灰色综合评价的控制网布测方案设计方法,构建了包含10项质量指标的评价体系,详细描述了各指标评价数据的获取途径。以长距离沉管隧道工程控制网布测为例,通过对5.8 km、7.2 km和8.6 km等不同长度的隧道内控网布测方案进行模拟计算与分析,验证了所构建的质量指标评价体系和基于灰色综合评价的控制网布测方案设计方法的有效性。

关键词:控制网;优化设计;指标体系;灰色综合评价;精密工程测量

中图分类号:P208 **文献标识码**:A **收稿日期**:2024-01-17

DOI:10.13203/j.whugis20230464 **文章编号**:1671-8860(2026)02-0306-10

Control Network Design of Megaproject Based on Grey Comprehensive Evaluation

LI Guanqing[1] *HUANG Shengxiang*[2] *ZHENG Nanshan*[1] *ZHAO Dongsheng*[1] *ZHANG Kefei*[1]

1 School of Environment and Spatial Informatics, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China

2 School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, Wuhan 430079, China

Abstract: **Objectives**: The design of the control network layout plan is the basis for achieving comprehensive optimization of quality indicators such as measurement accuracy, reliability and cost, and is also the prerequisite for ensuring project quality. **Methods**: A control network layout design method based on grey comprehensive evaluation theory is proposed. An evaluation system consisting of ten quality indicators was established, and the data acquisition approaches for each indicator were systematically described. The proposed method integrates grey relational analysis and comprehensive evaluation to quantify the overall performance of different layout schemes. A long-distance immersed tunnel project was selected as a case study, in which internal control network layout schemes for tunnel lengths of 5.8 km, 7.2 km, and 8.6 km were simulated and analyzed. **Results**: The simulation results demonstrate that the proposed evaluation system can effectively characterize the comprehensive quality of different control network layout schemes. The grey comprehensive evaluation method provides clear and stable ranking results for alternative schemes under varying tunnel lengths, enabling rational comparison and optimal scheme selection even with incomplete evaluation data. **Conclusions**: The proposed grey comprehensive evaluation - based control network layout design method effectively overcomes the limitations of traditional analytic hierarchy process based approaches in data-scarce design stages. It offers a practical and reliable decision-support tool for control net-

基金项目:国家自然科学基金(42404049);江苏省双创博士项目(JSSCBS20221498);辽宁工程技术大学辽宁省地理空间信息技术重点实验室开放研究基金(LNTUGIT2023-1-4)。

第一作者:李冠青,博士,讲师,主要研究方向为视觉测量与精密工程测量。guanqing_li@163.com

通信作者:黄声享,教授。sxhuang@whu.edu.cn

work layout design in large-scale and long-distance engineering projects, such as immersed tunnel construction, and has strong applicability and generalization potential.

Key words: control network; optimal design; evaluation system; grey comprehensive evaluation; precise surveying engineering

近年来,跨海通道、高速铁路、水利、大科学装置等大型工程蓬勃发展,其复杂的结构和高精度测量需求在施工、安装、检测与监测等环节对测量监控提出了更高要求,并驱动着精密工程测量的发展,其成为工程测量学科中最具活力的研究与实践方向[1-5]。

精密工程测量控制网方案设计极为重要,其内容涉及控制网网形、观测值类型及权重的选择,目的是使控制网满足精度、可靠性和费用要求。近年来,在理论和方法研究方面,为确定已知点的最佳位置并减小测量异常值对控制网坐标的影响,文献[6]提出了一种自主确定控制网已知点位置的方法。文献[7]分析了控制网质量指标间的关系,认为质量指标间存在联系而非相互独立。为使控制网在保持必要精度和可靠性的同时尽可能降低费用,文献[8]基于计算机模拟提出了一种在密网基础上不断减少观测值的控制网网型设计新方法,但该方法无法有效处理多个控制网布测方案具有相同数量观测值且均满足质量要求的情形。在案例研究方面,文献[9]和文献[10]分别针对沉管隧道施工控制网和二维后方交会网型进行了优化设计和分析。

不同控制网布测方案在多个质量指标上往往各有优劣,对其进行综合评价并给出优劣顺序属于典型的多目标决策问题。其他领域也存在此类似问题,如最优电磁环网解合环方案确定[11]、梯级水库联合蓄水方案多目标决策[12]、部件系统预防性维修策略联合优化[13]、山区铁路选线方案评价[14]等。在测量领域,多目标决策方法也已初步用于控制网设计。文献[15]利用层次分析法等多目标决策方法研究了控制网的已知点位置选择问题。文献[16]利用层次分析法进行了轨道控制网的网型设计。然而,在控制网布测方案的设计阶段,往往难以准确获取完整的评价数据,只能通过估算获取部分信息,因此控制网布测方案设计属于信息不完全的灰色系统。与层次分析法相比,灰色综合评价法更适用于处理含有灰色信息的决策问题[17-18]。综上所述,本文开展基于灰色综合评价的控制网布测方案设计方法研究。

综合评价的总体思路大致可分为确立评价的指标体系及各指标的权重、获取评价数据、分析评价结果等环节[19]。本文围绕控制网布测方案设计问题构建评价指标体系,分析评价数据获取方式,研究基于灰色综合评价的控制网布测方案设计方法,并以长距离沉管隧道为例,通过模拟分析验证所提方法的有效性。

1　灰色综合评价方法

灰色综合评价方法利用有限的已知信息来确定系统的未知信息,该方法对样本量和分布都没有要求,适应面广,可以较好地处理灰色系统[18]。

1.1　评价数据获取和规范化处理

若某个被评价系统含有n个评价指标和m个被评价对象,则可通过一定的方法获取m个被评价对象共$m\times n$个评价数据,形成评价矩阵$\boldsymbol{J}$:

$$\boldsymbol{J}=\begin{bmatrix} j_1(1) & j_1(2) & \cdots & j_1(n) \\ j_2(1) & j_2(2) & \cdots & j_2(n) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ j_m(1) & j_m(2) & \cdots & j_m(n) \end{bmatrix} \tag{1}$$

式中,$j_i(k)$表示第i个被评价对象在第k个指标上的评价值;$i=1,2,\cdots,m$;$k=1,2,\cdots,n$。

为消除不同评价值在量纲和数量级上的差别对后续步骤的影响,需对评价矩阵进行规范化处理,计算式为:

$$C_i(k)=\frac{j_i(k)\bar{J}(k)}{S(k)} \tag{2}$$

式中,$\bar{J}(k)$是所有被评价对象第k个指标的均值;$S(k)$是所有被评价对象第k个指标的标准差。规范化后的评价矩阵$\boldsymbol{C}$为:

$$\boldsymbol{C}=\begin{bmatrix} C_1(1) & C_1(2) & \cdots & C_1(n) \\ C_2(1) & C_2(2) & \cdots & C_2(n) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ C_m(1) & C_m(2) & \cdots & C_m(n) \end{bmatrix} \tag{3}$$

1.2　计算关联系数和绝对关联度

首先制定参考数列C_0,表示为$C_0=\begin{bmatrix} C_0(1) & C_0(2) & \cdots & C_0(n) \end{bmatrix}$,其中$C_0(k)$表示第$k$个指标所有评价值中的最优值,对于高优评价值取最大值,对于低优评价值取最小值。第i个方案

在第k个指标上的评价值相对于第k个指标的最优评价值的关联系数为:

$$\xi_i(k)=\frac{\min\limits_i\min\limits_k\left|C_0(k)-C_i(k)\right|+\rho\max\limits_i\max\limits_k\left|C_0(k)-C_i(k)\right|}{\left|C_0(k)-C_i(k)\right|+\rho\max\limits_i\max\limits_k\left|C_0(k)-C_i(k)\right|} \tag{4}$$

式中,ρ一般取值为0.5。据此得到关联系数矩阵$\boldsymbol{\Xi}$:

$$\boldsymbol{\Xi}=\begin{bmatrix}\xi_1(1) & \xi_1(2) & \cdots & \xi_1(n)\\ \xi_2(1) & \xi_2(2) & \cdots & \xi_2(n)\\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots\\ \xi_m(1) & \xi_m(2) & \cdots & \xi_m(n)\end{bmatrix} \tag{5}$$

若n个评价指标的权为$\boldsymbol{W}=\begin{bmatrix}w_1 & w_2 & \cdots & w_n\end{bmatrix}^{\mathrm{T}}$,则第$i$个被评价对象的绝对关联度为:

$$r_i=\sum_{j=1}^{n}\left[w_j\cdot\xi_i(j)\right] \tag{6}$$

r_i的值越大,表明第i个被评价对象与参考数列C_0越接近,综合评价越好,由此得到评价对象的综合排序。

2 基于灰色综合评价的控制网布测方案设计方法

2.1 指标体系构建

构建指标体系应遵循科学性、灵活性和实用性原则。大型工程控制网布测方案涉及控制网网型、观测值类型、观测值精度、观测值数量、已知点个数等,衡量控制网布测方案优劣的质量准则包括精度、可靠性和费用。文献[15]和文献[16]针对大地控制网和轨道控制网方案设计分别建立了相应的指标体系,如表1所示。在此基础上,结合GB 50026—2020《工程测量标准》等工程测量规范,并顾及大型工程控制测量的直接目的是获取具有足够精度的控制点坐标,满足工程施工建设的需要,本文对已有的控制网指标体系进行了扩充和优化,构建了新的指标体系,包括10个指标,如表1所示。

在精度指标方面,本文指标体系既包括已有的参数中误差(c_1和c_2),也增加了边长精度指标(c_3和c_4)以及方向精度指标(c_5),这与工程测量规范中控制测量主要技术要求的类型更为一致。当观测值相互独立时,其多余观测分量可作为判断控制网方案内部可靠性的尺度[20],且外部可靠性和内部可靠性具有一致性[21]。因此,在可靠性指标方面,结合已有指标体系的可靠性指标,设计了整体可靠性(c_6)、最小的可靠性分量(c_7)和大于阈值的可靠性分量数量(c_8)3个可靠性指标。控制网布测的费用涉及诸多因素,较难用函数准确描述。作为一种近似处理方法,文献[15]和文献[16]采用观测值权之和作为费用指标。然而,文献[22]中所涉及的多种控制网布测方案,当各方案的观测权之和差异较小时,其实际产生的测量费用却可能存在显著差别。另外,观测值的获取成本不仅与观测权大小有关,还与观测值类型、所采用的测量仪器及数据获取方法密切相关。因此在费用准则方面,本文不再采用观测值权的总和作为费用指标,设计了观测值权重的最大值(c_9)和观测值类型(c_{10})2个费用指标。

表1 3种不同控制网评价指标体系对比

Table 1 Three Different Types of Evaluation Index Systems of Control Network

指标体系	文献[15]		文献[16]		本文	
	指标	含义	指标	含义	指标	含义
精度	k_1	参数中误差最大值	Z_1	绝对点位中误差最大值	c_1	参数中误差最大值
	k_2	中误差小于阈值的参数数量	Z_2	绝对点位中误差小于阈值的比例	c_2	参数中误差小于阈值的比例
			Z_3	相对点位中误差最大值	c_3	最弱边边长相对中误差
			Z_4	相对点位中误差小于阈值的比例	c_4	边长相对中误差小于阈值的比例
					c_5	方向中误差最大值
可靠性	k_3	最小可靠性	Z_5	整体可靠性	c_6	整体可靠性
	k_4	可靠性大于阈值的观测值数量	Z_6	可靠性分量高于阈值的比例	c_7	最小的可靠性分量
					c_8	大于阈值的可靠性分量数量
费用	k_5	观测值权重最大值(权矩阵的范数)	Z_7	观测值权重总和	c_9	观测值权重最大值(权矩阵的无穷范数)
	k_6	观测值权重之和(权矩阵的迹)			c_{10}	观测值类型

对比本文与已有文献指标体系,其区别主要在于:精度方面,本文增加了边长和方向精度指标,在指标类型上更符合大型工程测量的主要技术要求;可靠性方面,兼顾了控制网布测方案的

整体可靠性和观测值可靠性分量;费用方面,根据不同观测值测量的特点设计了观测值类型这一新型费用指标。本文指标体系的指标覆盖度更广,具备较强的科学性和实用性,更适用于大型工程控制网的综合评价。

2.2　评价数据

获取评价数据指在控制网布测方案的设计阶段,通过理论评估、专家咨询等方式得到不同方案的指标数据。

1)精度指标

根据待评价控制网布测方案的网点概略坐标、拟选用仪器的标称精度等信息,采用模拟法,计算得到未知参数的协因数矩阵 $\boldsymbol{Q}_X$。若某观测值的先验中误差为 σ_i,则其权 p_i 为:

$$p_i=\frac{\sigma_0^2}{\sigma_i^2} \tag{7}$$

式中,σ_0 是先验单位权中误差。在控制网布测方案的设计阶段,可令 $\sigma_0^2=1$。指标 c_1 为:

$$c_1=\max\left(\mathrm{sqrt}\left(\mathrm{diag}\left(\sigma_0^2\boldsymbol{Q}_X\right)\right)\right) \tag{8}$$

式中,diag(·)为取矩阵主对角线元素运算。记 τ_1 为参数中误差阈值,则指标 c_2 为:

$$c_2=\frac{\mathrm{sum}\left(\mathrm{sqrt}\left(\mathrm{diag}\left(\sigma_0^2\boldsymbol{Q}_X\right)\right)<\tau_1\right)}{t} \tag{9}$$

式中,sum(·)为求满足条件向量元素个数运算;t 为未知参数个数;τ_1 可由工程的最高要求精度反算得到。若工程精度要求分为理想、可接受、预警等不同等级,τ_1 可由理想或可接受层级对应的精度要求反算得到。若 $c_2<1$,则控制网的精度不满足工程要求。

观测值协因数阵 $\boldsymbol{Q}_L$ 为:

$$\boldsymbol{Q}_L=B\left(B^{\mathrm{T}}PB\right)^{-1}B^{\mathrm{T}} \tag{10}$$

式中,B 为设计矩阵;P 为观测值权阵。

观测值的中误差向量 $\boldsymbol{m}_L$ 为:

$$\boldsymbol{m}_L=\mathrm{sqrt}\left(\mathrm{diag}\left(\sigma_0^2\boldsymbol{Q}_L\right)\right) \tag{11}$$

若观测值包含方向 L_1、边长 L_2、方位角 L_3、坐标 L_4,则 $\boldsymbol{m}_L$ 可表示为:

$$\boldsymbol{m}_L=\left[m_{L_1}\ m_{L_2}\ m_{L_3}\ m_{L_4}\right]^{\mathrm{T}} \tag{12}$$

式中,m_{L_1}、m_{L_2}、m_{L_3} 和 m_{L_4} 分别为方向、边长、方位角和坐标观测值的中误差。m_{L_2} 和 L_2 之比即为边长观测值的相对中误差 m_r。指标 c_3 为:

$$c_3=\max\left(m_r\right) \tag{13}$$

若边长相对中误差的阈值为 τ_2,则指标 c_4 为:

$$c_4=\frac{\mathrm{sum}\left(m_r<\tau_2\right)}{n_2} \tag{14}$$

式中,n_2 为边长观测值个数。指标 c_5 为:

$$c_5=\max\left(\boldsymbol{m}_{L_1}\right) \tag{15}$$

2)可靠性指标

平均多余观测分量表示控制网整体可靠性[21],指标 c_6 为:

$$c_6=\frac{n-t}{n} \tag{16}$$

式中,n 为总的观测值数量。

根据设计矩阵和权阵计算可靠性矩阵 $\boldsymbol{R}$:

$$\boldsymbol{R}=I-B\left(B^{\mathrm{T}}PB\right)^{-1}B^{\mathrm{T}}P \tag{17}$$

式中,$\boldsymbol{I}$ 为单位矩阵。$\boldsymbol{R}$ 的主对角线元素为观测值的多余观测分量,全部观测值的多余观测分量构成向量 $\boldsymbol{r}$,指标 c_7 为:

$$c_7=\min\left(\boldsymbol{r}\right) \tag{18}$$

记可靠性指标的阈值为 τ_3,指标 c_8 为:

$$c_8=\mathrm{sum}\left(\boldsymbol{r}>\tau_3\right) \tag{19}$$

3)费用指标

由式(7)可知,观测值权越大,观测精度越高,意味着需要采用更多的测回数、更复杂的测量规则或更高精度的测量仪器,所需的费用也就越高[23]。因此,本文引入反映观测权大小所含的费用水平指标 c_9:

$$c_9=\left\|\boldsymbol{P}\right\|_{\infty} \tag{20}$$

在大型工程地面控制测量中,方向和边长属于基本观测值,方位角、坐标等可视为辅助观测值。与基本观测值相比,辅助观测值的观测所需费用不同,如方位角观测所需的测量仪器、观测程序都比方向观测复杂,花费也更高。本文引入了观测值类型因子 f 和数量因子 ω,其取值根据工程的结构、环境和施工工艺综合确定,指标 c_{10} 定义为:

$$c_{10}=\sum_{k=1}^{u}\omega_k\cdot f_k \tag{21}$$

式中,u 为观测值类型的数量。

2.3　基于灰色综合评价的设计方法

基于灰色综合评价的设计流程如图 1 所示。根据控制网布测方案和评价数据获取方法,获取不同方案的评价指标,形成评价矩阵 $\boldsymbol{J}$。为消除精度、可靠性和费用等不同评价指标量纲和数量级对后续步骤的影响,对矩阵 $\boldsymbol{J}$ 进行规范化处理,得到规范化矩阵 $\boldsymbol{C}$。在每个指标所有评价值中选取最优值,形成参考数列 C_0,计算关联系数,得到关联系数矩阵 $\boldsymbol{\Xi}$。利用层次分析法,确定各指标的权 $\boldsymbol{W}$。最后,计算各方案绝对关联度,对绝对关联度进行排序,做出综合评价。

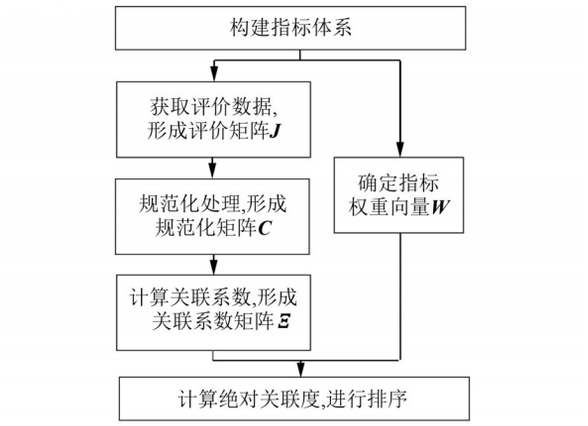


图1 基于灰色综合评价的大型工程控制网布测方案设计方法流程图

Fig. 1 Flowchart of the Megaproject Network Design Method Based on Grey Comprehensive Evaluation

3 沉管隧道内部控制网布测方案

以长距离沉管隧道工程为例,验证基于灰色综合评价的控制网布测方案设计方法。本节对沉管隧道内部不同控制网布测方案进行分析。港珠澳大桥沉管隧道、深中通道沉管隧道等大型离岸沉管隧道工程,结构和施工环境复杂、测控精度要求高[24-25]。隧道内控制网布测方案包括导线网和双线形联合锁网,不同隧道内控制网布测方案分析如下:

1)方向、边长观测的全导线网。网形如图2(a)所示,观测值包括方向和边长,导线网点成对布设,导线网边长约为500~700 m。

2)方向、边长观测的双线形联合锁网。沉管隧道常为多孔廊结构,两个行车孔各布设一个全导线网,利用短边边长测量把两个全导线网连接为整体,网形如图2(b)所示。虚线表示短边,长度约为20~40 m,长边边长约500~700 m。该方案观测值数量大网形复杂,已应用于港珠澳大桥沉管隧道。

3)方向、边长和方位角观测的全导线网。网形如图2(c)~图2(f)所示,观测值包括方向、边长和方位角,方位角的个数为1个或多个,导线网边长约500~700 m;相同个数的方位角,若位置不同可形成不同的布测方案。

4)方向、边长和坐标观测的全导线网。网形如图2(g)~图2(h)所示,导线网边长约为500~700 m,坐标位置和个数不同可形成不同的布测方案。坐标观测值由管节安装定位系统[26]提供。管节安装过程中定位系统可实时测量管节位置和姿态,沉管安装定位系统的信息见文献[26-28]。坐标观测值被用于进行控制测量需满足一定条件,即管节安装定位系统和控制测量的结果具有较好一致性[22]。

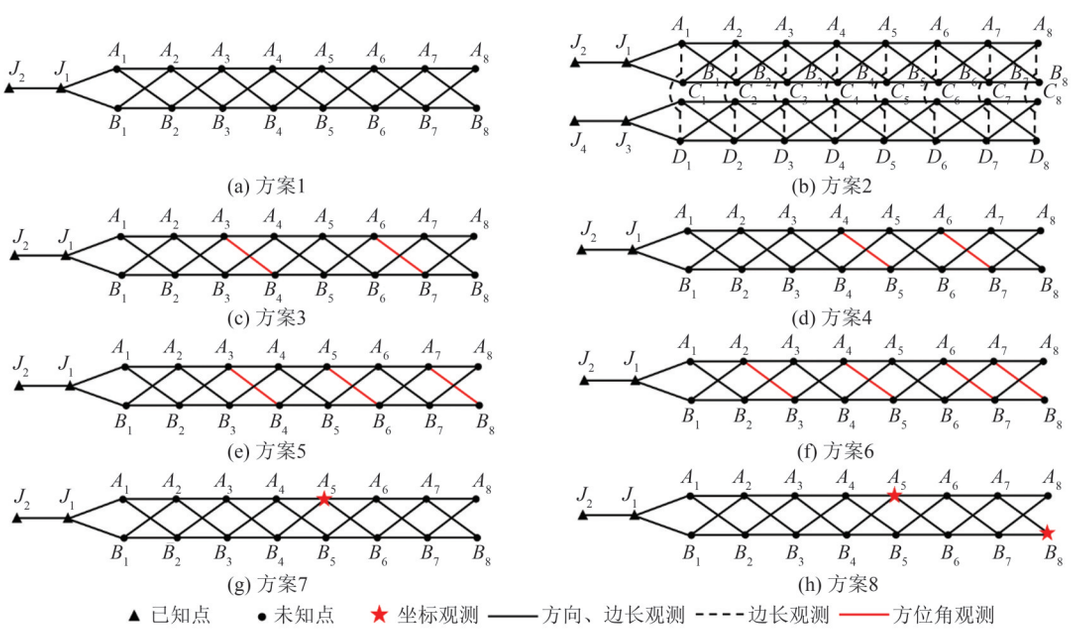


图2 沉管隧道内部控制网布测方案

Fig. 2 Layout Schemes of the Control Network Inside the Immersed Tunnel

4 模拟计算与分析

港珠澳大桥沉管隧道和深中通道沉管隧道的沉管段长度均在5.0~6.0 km。基于此,本文首先模拟进行长度约5.8 km的单向控制测量。模拟隧道基本条件设为:隧道轴线沿东西向直线分

布,隧道从两端施工,工程坐标系 Y 轴平行于隧道轴线;隧道内单侧控制网最弱点坐标中误差不大于 3.5 cm;管节安装定位系统提供管节安装后的初始坐标,该坐标可被用于控制测量。

通过改变控制网网型及观测值类型、数量、与布设位置,共构建 8 种控制网布测方案,各方案基本信息如图 2 和表 2 所示。表 2 中坐标观测值个数为总的坐标分量个数,每个平面控制点对应两个坐标分量。所有方案中,导线网边长为 720 m,隧道口控制点 J_1 至控制网尾端约 5.8 km。方案 2 中短边长度为 25 m,方向、边长、方位角和坐标观测值的先验中误差分别为 1″、$(0.6+1\times10^{-6}D)$mm(其中 D 为控制网边的长度,单位为 km、3.5″和 3.0 cm)。

按照评价数据获取方法,计算各布测方案指标数据。参数中误差的阈值 τ_1 设为 3.5 cm,边长相对中误差的阈值 τ_2 设为 1/150 000,可靠性指标的阈值 τ_3 设为 0.5。观测值类型因子和数量因子的设计情况如表 3 所示。

因方位角测量需采用高精度陀螺全站仪,按方位角个数计算,且测量规则远比边长和方向测量复杂,故方位角的数量因子等于方位角个数。沉管隧道中,管节初始位置由安装定位系统提供,根据系统标定结果和管节初始位置,通过坐标转换即可得到坐标观测值,没有额外增加外业测量工作,因此坐标观测值类型因子设定为 0.5,数量因子等于坐标观测值个数。经计算,各方案评价指标数据如图 3 所示,规范化结果如图 4 所示。

表 2　单方向 5.8 km 长控制网布设方案基本信息

Table 2　Basic Information of Single-Direction Control Network Layout Schemes of 5.8 km

方案	网型	基本观测值个数		辅助观测值个数	
		方向	边长	方位角	坐标
1	全导线网	61	30	—	—
2	双线形联合锁网	122	68	—	—
3	全导线网	61	30	2	—
4	全导线网	61	30	2	—
5	全导线网	61	30	3	—
6	全导线网	61	30	4	—
7	全导线网	61	30	—	2
8	全导线网	61	30	—	4

表 3　观测值类型因子和数量因子

Table 3　Type and Number Factors of the Observations

观测值类型	类型因子	数量因子
方向	$f_1=1$	$\omega_1=1$
边长	$f_2=1$	$\omega_2=1$
方位角	$f_3=1$	$\omega_3=$方位角个数
坐标	$f_4=0.5$	$\omega_4=$坐标个数

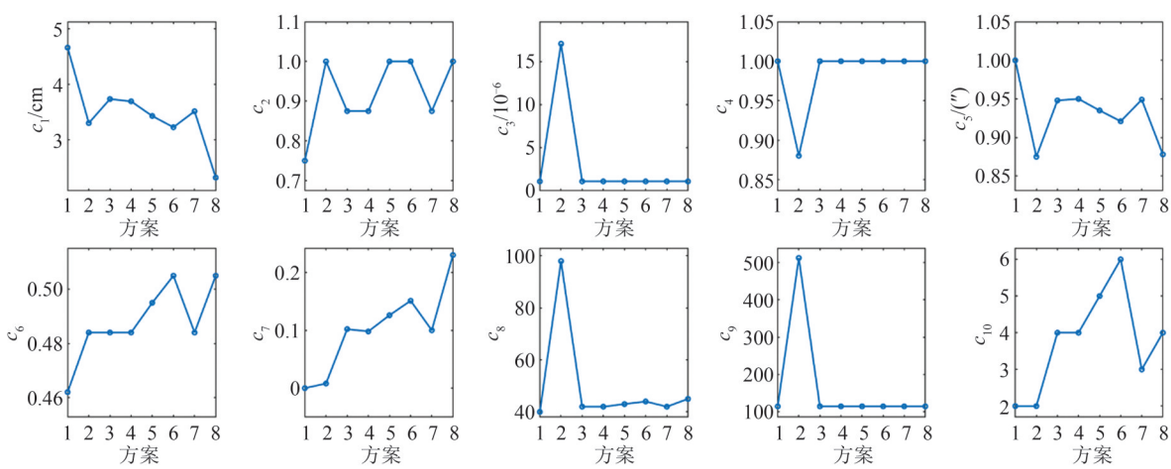


图 3　单方向 5.8 km 长控制网布测方案评价指标数据

Fig. 3　Evaluation Indicator Data for Single-Direction Control Network Layout Schemes of 5.8 km

根据评价指标的规范化值,计算关联系数矩阵 $\boldsymbol{\Xi}$,结果如表 4 所示。利用层次分析法确定各指标权重,指标定权结果如表 5 所示,c_2 的权重最大。利用关联系数和指标权重,计算各方案的绝对关联度,结果见表 4。

为分析本文控制网指标体系和基于该指标体系的灰色综合评价大型工程控制网布测方案设计方法的有效性,将其与基于本文指标体系的层次分析法和基于文献[15]指标体系的层次分析法得到的结果进行对比,结果如图 5 所示。灰色综合评价和基于本文指标体系的层次分析法得到的结果总体较为一致。c_2 小于 1 的方案排序均较靠后,这是由于 τ_1 取值为 3.5 cm,若存在参数中误差不满足该阈值条件,表明方案不能满足工程精度要求。三种评价方法均认为方案 8 最优。该方案引入沉管安装定位系统提供的坐标作为

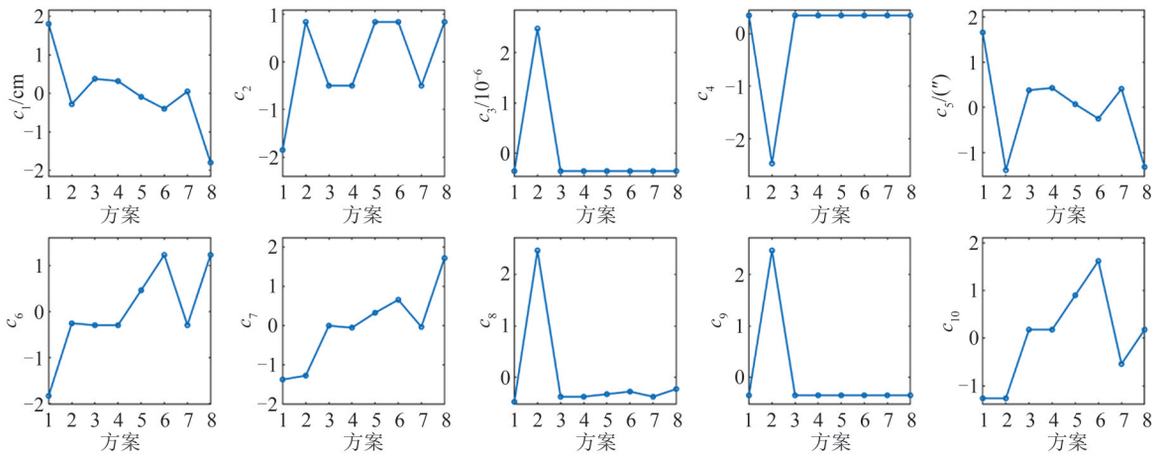


图4 单方向5.8 km长控制网布测方案评价指标数据的规范化值

Fig. 4 Normalized Values of Evaluation Indicators for Single-Direction Control Network Layout Schemes of 5.8 km

表4 单方向5.8 km长控制网布测方案的关联系数

Table 4 Relational Coefficients of Single-Direction Control Network Layout Schemes of 5.8 km

指标	方案1	方案2	方案3	方案4	方案5	方案6	方案7	方案8
c_1	0.333	0.543	0.453	0.460	0.513	0.563	0.495	1.000
c_2	0.401	1.000	0.573	0.573	1.000	1.000	0.573	1.000
c_3	1.000	0.389	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
c_4	1.000	0.389	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
c_5	0.371	1.000	0.504	0.497	0.552	0.613	0.500	0.960
c_6	0.370	0.548	0.540	0.540	0.701	1.000	0.540	1.000
c_7	0.368	0.376	0.512	0.505	0.565	0.630	0.508	1.000
c_8	0.379	1.000	0.388	0.388	0.392	0.396	0.388	0.401
c_9	1.000	0.389	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
c_{10}	1.000	1.000	0.556	0.556	0.455	0.385	0.715	0.556
绝对关联度	0.565	0.771	0.606	0.606	0.760	0.803	0.633	0.912

表5 指标权重及类型

Table 5 Weights and Types of Each Index

项目指标	权重	类型	项目指标	权重	类型
c_1	0.119	低优	c_6	0.086	高优
c_2	0.294	高优	c_7	0.086	高优
c_3	0.055	低优	c_8	0.086	高优
c_4	0.055	高优	c_9	0.049	低优
c_5	0.055	低优	c_{10}	0.115	低优

观测值,虽然沉管安装定位系统的设计初衷是在沉管安装过程中提供管节的实时位置和姿态信息,但其同样提供沉管安装完成后的初始坐标。方案8充分考虑沉管隧道的工程特点和施工工艺,实现了隧道内控制测量和沉管安装定位两项关键测控任务的整合。

灰色综合评价和基于本文评价指标体系的层次分析两种评价方法在结果中的差异主要体现在方案2和方案6以及方案3和方案4的优劣。对比方案2和方案6的10个评价指标(图3和图4),方案2占优的指标有3项,方案6占优的指标

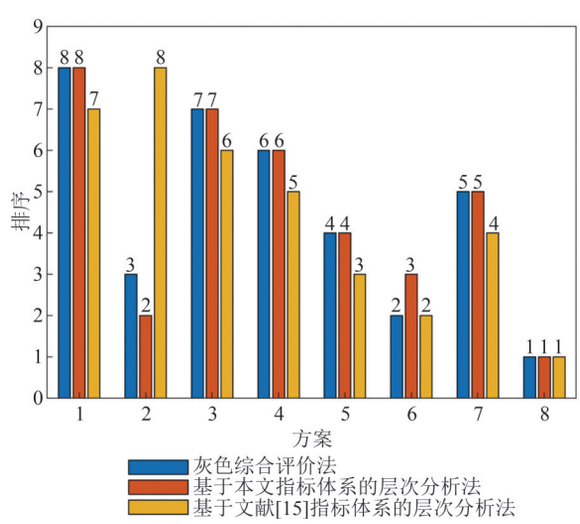


图5 5.8 km单方向控制网布测方案综合排序

Fig. 5 Comprehensive Ranking of Single-Direction Control Network Layout Schemes of 5.8 km

有6项,权重最大的c_2指标在2种方案中相同。2种方案在精度、可靠性、费用3类指标中均各有占优。层次分析法认为方案2更优,该方案最初是

为满足港珠澳大桥沉管隧道的高精度测控需求而专门设计的,并被实际工程采用,实践已证明该方案的精度和可靠性能够满足长距离沉管隧道工程建设的需求。灰色综合评价法认为,方案6较优,该方案在全导线网基础上通过加测陀螺定向边优化而来。方案3和方案4中的10个评价指标中有7个指标相同,其他3个指标也非常相近,且各有占优。基于文献[15]评价指标体系的层次分析法认为方案2在8种方案中综合质量最差,综合排序甚至低于不满足工程需求的方案1和方案3,该结果显然不符合工程实际,进一步表明本文构建的控制网质量评价指标体系的合理性。

为进一步对比方案2和方案6的优劣,分别对长度约为7.2 km和8.6 km的单方向控制测量进行模拟,其他各项参数设置均与上文相同。分析结果如表6所示,灰色综合评价法和基于本文指标体系的层次分析法的结果一致,均认为方案6更优,表明在测控距离进一步增大的情况下,方案6的确具有突出的综合表现。

表6　7.2 km和8.6 km单方向控制网布测方案综合排序

Table 6　Comprehensive Ranking of Single-Direction Control Network Schemes of 7.2 km and 8.6 km

测控长度/km	方案	方案说明	综合排序	
			灰色综合评价法	层次分析法
7.2	2	双线形联合锁网	2	2
	6	全导线网均匀加测4个方位角	1	1
8.6	2	双线形联合锁网	2	2
	6	全导线网均匀加测5个方位角	1	1

单方向5.8 km、7.2 km和8.6 km的控制测量模拟实验表明,本文所构建控制网评价指标体系和基于该指标体系的灰色综合评价控制网布测方案设计方法是有效的。该方法能够对多种不同控制网布测方案进行兼顾精度、可靠性和费用等准则的综合评价,并合理给出长控制网布测方案的优劣顺序。

5　结　语

本文基于灰色综合评价研究了大型工程控制网布测方案设计方法,建立了包含精度、可靠性和费用3类共10项指标的综合评价体系,并引入观测值类型等新型费用指标。详述了指标数据的获取方法,设计了观测值的类型因子和数量因子,实现观测值类型的定量计算。以长距离沉管隧道为例,分析了不同网形、观测值类型、观测值位置等8种隧道内控制网布测方案。模拟长度约为5.8 km的单方向控制测量,利用不同评价方法得到了各方案的综合评价结果,证明了本文构建的控制网质量评价指标体系的合理性。进一步,针对长度约为7.2 km和8.6 km进行单方向控制测量模拟。结果表明,与层次分析法相比,本文提出的灰色综合评价法能够更精确地对不同控制网布测方案做出评价,可为大型复杂工程的控制网布测方案优化提供参考。

参　考　文　献

[1] 李清泉, 汪驰升, 熊思婷, 等. 从几何计算到特征提取的广义测量数据处理[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2022, 47(11): 1805-1814.
LI Qingquan, WANG Chisheng, XIONG Siting, et al. Generalized Surveying Data Processing: From Geometric Parameters Calculation to Feature Information Extraction[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2022, 47(11): 1805-1814.

[2] 姜卫平, 梁娱涵, 余再康, 等. 卫星定位技术在水利工程变形监测中的应用进展与思考[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2022, 47(10): 1625-1634.
JIANG Weiping, LIANG Yuhan, YU Zaikang, et al. Progress and Thoughts on Application of Satellite Positioning Technology in Deformation Monitoring of Water Conservancy Projects[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2022, 47(10): 1625-1634.

[3] LI Z C, LU Z Y, ZHANG G Y, et al. A Precise Calibration Method on Phase Center of Uplink Antenna Array Considering Its Actual Pointing[J]. *Journal of Geodesy and Geoinformation Science*, 2020, 3(1): 93-101.

[4] 李敏, 李琼, 苏勇. 采用高精度地球重力场模型计算垂线偏差及隧道贯通误差[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2024, 49(10): 1922-1930.
LI Min, LI Qiong, SU Yong. Calculation of Vertical Deviation and Tunnel Through Error Based on High-Precision Earth Gravity Field[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2024, 49(10): 1922-1930.

[5] 罗涛, 何晓业, 汪昭义, 等. 粒子加速器隧道准直测量中激光跟踪仪光束法平差的误差分析和应用研究[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2023, 48(6): 919-925.

LUO Tao, HE Xiaoye, WANG Zhaoyi, et al. Error Analysis and Application of Laser Tracker's Bundle Adjustment in the Tunnel Alignment Measurement of Particle Accelerator[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2023, 48(6): 919-925.

[6] MATSUOKA M T, ROFATTO V F, KLEIN I, et al. Control Points Selection Based on Maximum External Reliability for Designing Geodetic Networks [J]. *Applied Sciences*, 2020, 10(2): 687.

[7] KLEIN I, MATSUOKA M T, GUZATTO M P, et al. A New Relationship Between the Quality Criteria for Geodetic Networks[J]. *Journal of Geodesy*, 2019, 93(4): 529-544.

[8] POSTEK P. New Computer Simulation Method for First-Order Design of Geodetic Network: Aiming for Low Cost[J]. *Journal of Surveying Engineering*, 2021, 147: 04020020.

[9] HUANG S, LI G, WANG X, et al. Geodetic Network Design and Data Processing for Hong Kong - Zhuhai - Macau Link Immersed Tunnel[J]. *Survey Review*, 2019, 51(365): 114-122.

[10] SONG Z F, ZHAO C X, PU H, et al. Configuration Analysis of Two-Dimensional Resection Networks [J]. *Journal of Surveying Engineering*, 2016, 142(4): 04016018.

[11] 蔡万通, 刘文颖, 张宁, 等. 基于惩罚性变权最优综合评价模型的电磁环网解合环方案分析[J]. 电网技术, 2017, 41(7): 2316-2323.
CAI Wantong, LIU Wenying, ZHANG Ning, et al. Analysis of Electromagnetic Loop Network on Loop Closing or Opening Based on Model of Optimal Comprehensive Evaluation with Punitive Variable Weight[J]. *Power System Technology*, 2017, 41(7): 2316-2323.

[12] 周研来, 郭生练, 陈进. 溪洛渡-向家坝-三峡梯级水库联合蓄水方案与多目标决策研究[J]. 水利学报, 2015, 46(10): 1135-1144.
ZHOU Yanlai, GUO Shenglian, CHEN Jin. Multi-Objective Decision and Joint Refill Schemes of Xiluodu-Xiangjiaba-Three Gorges Cascade Reservoirs [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2015, 46(10): 1135-1144.

[13] 赵潇. 基于多目标决策的单部件系统预防性维修联合优化策略研究[D]. 北京: 北京科技大学, 2021.
ZHAO Xiao. Research on the Optimization Strategy of Preventive Maintenance for a Single-Unit System Based on Multicriteria Decision-Making[D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2021.

[14] 罗圆. 基于不确定性分析的山区铁路选线方案评价方法研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2016.
LUO Yuan. Research of Scheme Evaluation of Mountain Railway Location Based on Uncertainty Analysis[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2016.

[15] KOBRYŃ A. Multicriteria Decision Making in Geodetic Network Design[J]. *Journal of Surveying Engineering*, 2020, 146: 04019018.

[16] 宋占峰, 杨飞, 李军. 基于多目标决策的轨道控制网网形设计[J]. 铁道学报, 2020, 42(6): 86-92.
SONG Zhanfeng, YANG Fei, LI Jun. Network Design of Track Maintenance Control Network Based on Multi-Objective Decision Making[J]. *Journal of the China Railway Society*, 2020, 42(6): 86-92.

[17] HUANG Kun, CHEN Senfa, SUN Yan, et al. Study and Implementation on the Grey Comprehensive Evaluation Support System of Ecocity[J]. *Journal of Southeast University (English Edition)*, 2002, 18(4): 356-360.

[18] 郝楠楠, 郑兵, 张超勇. 灰模糊积分在多目标决策中的应用[J]. 浙江大学学报(工学版), 2018, 52(4): 663-673.
HAO Nannan, ZHENG Bing, ZHANG Chaoyong. Application of Gray Fuzzy Integral in Multi-Objective Decisions[J]. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 2018, 52(4): 663-673.

[19] 杜栋, 庞庆华, 吴炎. 现代综合评价方法与案例精选[M]. 3版. 北京: 清华大学出版社, 2015.
DU Dong, PANG Qinghua, WU Yan. Modern Comprehensive Evaluation Method and Case Selection [M]. 3rd ed. Beijing: Tsinghua University Press, 2015.

[20] 李德仁, 袁修孝. 误差处理与可靠性理论[M]. 2版. 武汉: 武汉大学出版社, 2012.
LI Deren, YUAN Xiuxiao. Error Processing and Reliability Theory[M]. 2nd ed. Wuhan: Wuhan University Press, 2012.

[21] 张正禄. 工程测量学[M]. 3版. 武汉: 武汉大学出版社, 2020.
ZHANG Zhenglu. Engineering Surveying[M]. 3rd ed. Wuhan: Wuhan University Press, 2020.

[22] LI G Q, HUANG S X, WANG X P, et al. A New Alignment and Breakthrough Accuracy Optimization Strategy in Long Immersed Tunnel Surveys [J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 228326-228336.

[23] BAGHERBANDI M, ESHAGH M, SJÖBERG L E. Multi-Objective Versus Single-Objective Models in Geodetic Network Optimization[J]. *Nordic Journal of Surveying and Real Estate Research*, 2009, 6(1): 7-20.

[24] 黄声享, 李冠青, 张文, 等. 港珠澳大桥沉管隧道施工控制网布设研究[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2019, 44(5): 640-647.
HUANG Shengxiang, LI Guanqing, ZHANG Wen, et al. Surveying Network Design for Hong-Kong-Zhuhai-Macao Bridge Link Immersed Tunnel [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2019, 44(5): 640-647.

[25] 宋神友, 陈伟乐, 金文良, 等. 深中通道工程关键技术及挑战[J]. 隧道建设(中英文), 2020, 40(1): 143-152.
SONG Shenyou, CHEN Weile, JIN Wenliang, et al. Key Technologies and Challenges of Shenzhong Link [J]. *Tunnel Construction*, 2020, 40(1): 143-152.

[26] 锁旭宏. 组合式测控技术在外海超长沉管隧道安装中的应用[J]. 公路, 2018, 63(8): 37-42.
SUO Xuhong. Application of Combined Measurement and Control System in the Installation of Immersed Tunnel in Deep Sea[J]. *Highway*, 2018, 63(8): 37-42.

[27] 成益品, 陈伟乐, 宋神友, 等. 深中通道沉管安装测量塔法浮态标定与坐底标定精度对比试验[J]. 隧道建设(中英文), 2021, 41(8): 1399-1403.
CHENG Yipin, CHEN Weile, SONG Shenyou, et al. Calibration Accuracy Comparison Between Floating State of Measuring Tower and Coordinate Bottom for Immersed-Tube Installation in Shenzhen-Zhongshan Link[J]. *Tunnel Construction*, 2021, 41(8): 1399-1403.

[28] 赵坤. 港珠澳大桥沉管隧道测控系统研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2015.
ZHAO Kun. Research of the Immersed Tube Tunnel Surveying System[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2015.