

梁格法在桥梁设计中的应用研究

刘泽成

山东省路桥集团有限公司 山东 济南 250021

【摘要】：为评估梁格法在复杂桥梁结构中的适用性，本文系统研究了其理论基础、建模方法及其在窄桥、宽桥、斜桥和曲线桥中的应用。通过与刚接板法、铰接板法等横向分布系数方法对比，并结合参数敏感性分析发现，梁格法在宽桥设计中具有较高计算精度（误差 $<8\%$ ）；对于斜桥（斜交角 $\theta \leq 45^\circ$ ）与曲线桥（曲率半径 $R \geq 2L$ ），经合理修正横向刚度与抗扭刚度后，能够较好反映结构的弯扭耦合效应。研究表明，梁格划分是影响计算精度的重要因素，纵向梁格间距应满足横向误差指数衰减规律（ $n \geq 5B/L$ ）；当横向虚拟梁刚度取值不合理时，横向弯矩误差可能超过10%。

【关键词】：梁格法；横向分布系数；斜桥；曲线桥；抗扭刚度；参数敏感性

DOI:10.12417/3083-5526.25.11.005

引言

桥梁的设计、结构分析乃是确保桥梁具备安全性、经济性、适用性的关键基础所在。例如曲线桥、斜桥还有宽桥这类复杂桥型，其独特的几何特性、受力规律给分析方法提出了更高的要求。传统的梁理论较难满足精确计算方面的需求，所以，对于更高效的桥梁分析方法展开研究已然成为行业所关注的重点内容。

梁格法是一种有效的桥梁结构分析手段，近些年来于桥梁工程领域得以广泛运用。其基本思想是采用等效梁格模型表征桥梁上部结构，通过对弯曲刚度、抗扭刚度及纵横刚度进行合理等效，利用矩阵位移法完成结构分析与求解。这个方法能够较好地适配多种桥型，不管是窄桥、宽桥，亦或是斜交桥、曲线桥，都可通过恰当的梁格划分展开准确的结构分析。

梁格法在桥梁设计中的应用国内外已展开研究。早期有 E. C. 汉勃利所著的《桥梁上部构造性能》，对梁格法的原理和应用进行了系统阐述，为梁格法的发展奠定了理论基础^[1]。在实际应用方面，侯满等人对马来西亚槟城二桥工程采用英国标准进行桥梁设计施工，设计中提出了考虑施工过程的空间梁格法，该方法可真实、动态地模拟横隔梁各施工阶段受力^[2]。董营等人阐述梁格法基本原理，分析梁格划分与梁格截面计算问题，通过工程案例证明梁格法计算结果精度高、操作便捷，在城市桥梁设计领域有推广价值^[3]。戴公连等人在其著作中对桥梁结构空间分析设计方法包括梁格法进行了介绍与应用探讨^[4]。冯卓雄在胜利大桥主桥设计中应用梁格法等相关技术进行设计分析^[5]。张剑研究薄壁箱型结构位移参数相关内容，其成果可为梁格法在薄壁箱梁结构分析中的应用提供参考^[6]。

本文重点研究梁格法的基本原理、建模方法及其在窄桥、宽桥、斜桥和曲线桥中的适用性。通过与刚接板法、铰接板法等方法对比，并结合参数敏感性分析，验证其计算精度；同时考虑斜交角和曲率半径等因素，探讨刚度修正及网格优化方法。

1 梁格法的基本理论

1.1 基本原理

梁格法采用等效梁格体系模拟桥梁上部结构，并基于矩阵位移法进行结构分析。建模时需满足刚度与变形等效原则，即将板梁或箱梁的抗弯、抗扭刚度合理分配至相应梁格；纵向和横向受力特性分别由纵、横梁格表征。在相同荷载条件下，梁格模型应与实际结构具有一致的挠度响应，其弯矩、剪力及扭矩等内力也应与对应结构部位保持等效。

1.2 等效原则

在箱形截面的梁格划分中，两侧翼缘一般单独模拟，中部顶板、底板及腹板则等效为工字形截面。构件抗弯刚度取决于弹性模量和截面惯性矩，后者可由各组成部分对中性轴惯性矩的叠加求得，如式（1）所示。

$$EI_0 = \sum EI_i \quad (2)$$

式中： E 为弹性模量， I_0 为整体截面惯性矩， I_i 为梁格部分截面对中性轴的惯性矩。

箱形整体截面受扭时，顶板、腹板和底板中的剪力相互传递，形成闭合的环状剪力流。

在梁格法的截面受力体系中，总扭矩由构件自身扭矩和构件间传递的剪力共同承担。构件间剪力与扭转效应相平衡，并形成闭合剪力流，其受力特性与箱梁整体扭转状态基本一致。梁格构件的扭矩可视为箱梁整体扭转时顶、底板中的剪力流，而构件间传递的剪力则对应腹板中的剪力流。因此，在纵向截面划分条件下，梁格体系的等效刚度可视为构件抗扭刚度与构件间剪力共同作用的结果，如式（2）所示。

$$GJ_0 = \sum \left(GJ_i + S_{Ti} \cdot \frac{S_{Ti}}{2} \right) \quad (3)$$

式中： G 为剪切模量， J_0 为整体截面极惯性矩， J_i 为梁

格部分截面对中性轴的极惯性矩， S_{ti} 为梁格部分端部剪力值， S_i 为梁格部分截面的宽度。

1.3 梁格法建模

梁格单元的划分方式直接影响计算精度，因此需通过优化建模方案提高模型与箱梁实际受力特性的吻合程度。

(1) 纵向梁格通常沿腹板位置布置，使纵梁能够反映腹板受力特征；为保证模型完整性并便于荷载施加，常在悬臂端设置虚拟纵梁。(2) 应尽量保证各部分形心轴与原截面形心轴一致，使梁格在纵向弯曲时满足与原结构相同的平截面假定。(3) 梁格模型中，纵梁与横梁通常采用正交布置，以反映结构的实际受力状态。(4) 虚拟横梁间距通常不大于反弯点间距的 1/4，并宜在跨中及 1/4 跨处布置横梁，以保证荷载在纵梁间连续传递。对于内力变化较大的区域，应适当加密梁格，以提高内力分布的合理性。(5) 以整体箱形截面的自由扭转刚度为基础，将其等效分配至各纵梁，以表征结构的抗扭性能。

2 梁格法在不同桥型中的应用

2.1 窄桥

该方法结合结构力学与梁格法进行分析。对于等截面圆弧形窄桥弯梁，可将结构简化为曲杆，以扭矩代替抗扭支座，并依据变形协调条件求解未知力。梁格法通过等效梁格模拟桥梁上部结构，本质上属于基于梁单元的有限元分析方法。两种方法结合后，可较高效地完成窄桥弯梁受力分析，且具有概念明确、建模简便和计算效率较高等优点。

2.2 宽桥

对于宽箱梁桥可采用折面梁格法分析受力特性及梁格划分。通过将汽车荷载横向分布计算结果与常用方法进行对比，验证该方法在宽箱梁桥分析中的准确性和适用性；同时研究其对阶梯式剪力滞效应的模拟能力，并探讨纵、横向梁格尺寸的合理划分原则。

在横向分布系数研究中，以密排式小箱梁宽桥为对象，采用梁格法计算 5 片梁的横向分布系数，并与刚性横梁法、刚接板（梁）法和铰接板（梁）法等常用方法的结果进行比较，数据如表 1 所示。

表 1 箱梁桥横向分布系数对比

梁号	刚性横梁法	刚接板法	铰接板法	梁格法
1	0.28	0.258	0.256	0.279
2	0.252	0.251	0.258	0.257
3	0.241	0.243	0.251	0.273
4	0.225	0.229	0.237	0.261
5	0.209	0.211	0.219	0.238

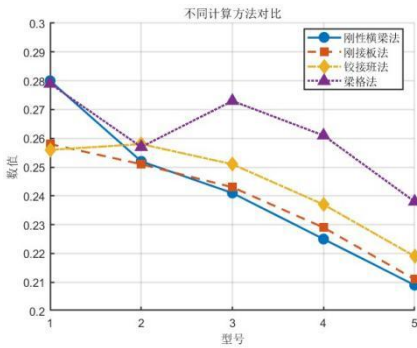


图 1 横向分布系数对比

表 1 为用各方法计算出的横向分布系数，从图 1 中可以看出刚接板（梁）法与铰接板（梁）法的计算结果较为一致；刚性横梁法与数值解结果最接近，但计算值仍略偏小。

2.3 斜桥与曲线桥

2.3.1 斜桥中的应用

采用梁格法对斜交板进行分析时，其主要特点为：

(1) 靠近钝角处出现上拱弯矩；(2) 钝角处通常会产生较大的支反力和剪力，而钝角隅位置反力较小，局部甚至可能出现翘起现象。(3) 承受较大的扭转。

运用梁格法分析时，考虑斜交角(θ)导致荷载传递路径倾斜引发：非对称横向分布（外侧梁受力>内侧）和支座位置产生附加扭矩。

在进行建模时，主要考虑：

- (1) 纵向梁间距：通常取桥宽/5-8(θ 越大，间距需越小)；
- (2) 斜交修正：调整横向梁刚度，采取经验公式 3：

$$k_{t,斜} = k_{t,直} \cdot \cos^2 \theta \quad (4)$$

当 $\theta = 30^\circ$ 时，横向刚度降低至原值的 75%。

(3) 边界条件：斜交端支座需增加转动约束刚度，防止模型失真，见式子 4：

$$K_{\text{支座}} = \frac{3EI}{L} \sin \theta \quad (5)$$

当 $\theta = 45^\circ$ 时，刚度需要提高至直桥的 1.4 倍。

2.3.2 曲线桥中的应用

核心问题考虑曲率半径(R)导致：弯扭耦合效应（竖向荷载引发不可忽略的扭矩）以及离心力分布不均（外侧梁承受更大活载）。其建模的关键主要考虑：

(1) 主梁布置：纵向梁沿曲线切线方向离散；(2) 曲率修正：抗扭刚度需放大；(3) 离心力模拟：将车辆荷载分解为径向分量（离心力）和切向分量；(4) 考虑关键参数对弯扭矩的影响，对 $R = 80m$ 的曲线连续梁桥分析，见表 2 所示：

表 2 关键参数变化对弯扭矩的影响

参数变化	外侧梁弯矩变化	内侧梁弯矩变化	扭矩变化
减小 20%	+18%	-15%	+25%
虚拟横梁增加 50%	-7%	+6%	-12%
忽略弯扭耦合	低估 26%	高估 19%	误差 38%

分析研究发现，对斜桥与曲线桥运用梁格法时，需要满足：

（1）斜桥：适合 $\theta \leq 50^\circ$ 的中小跨径桥，重点关注支座区域的扭矩分配；（2）曲线桥：需明确曲率半径与跨径比（建议 $R/L \geq 2.5$ ），重点控制弯扭耦合效应；（3）通用原则：虚拟横梁数量 >5 道/跨时，横向分布误差可控制在 8% 以内。

3 梁格划分原则对精度的影响

3.1 纵向划分准则

考虑间距控制，直桥的横向分布误差会随着纵向梁数增加而下降。当纵向梁数满足 $n \geq 5B/L$ （ B 为桥宽， L 为跨径）时，弯矩误差通常可控制在 5% 以内。对于变截面桥，截面突变处应满足渐变要求（相邻单元高度差满足规定限值），否则应力误差可能超过 15%。同时需考虑轴线对齐，其中包含错位效应（主梁轴线偏离实际形心线 1% 跨度时，连续梁桥中支点弯矩偏差可达 8.3%）和曲线桥修正：采用 Frenet 标架理论建立曲线坐标系，可降低曲率引起的扭矩误差（误差从 12% 降至 4.5%）。

3.2 横向虚拟梁的设置

横向虚拟梁刚度需满足等效薄板理论：

$$k_t = \frac{Et^3}{12(1-\nu^2)s} \tag{5}$$

式中， t 为板厚， s 为横向间距， ν 为泊松比。当 k_t 偏差 $>20\%$ 时，横向弯矩分布误差突破 10%。对于虚拟梁的连接类型不同，在梁格法中对弯矩以及剪力滞也会产生不同的影响，具体见表 3。

表 3 不同连接类型对梁格法的影响

连接类型	横向弯矩误差	剪力滞效应捕捉能力
完全刚接	+15%~-8%	低估 20%~30%

参考文献：

[1] E.C.汉勃利.桥梁上部构造性能[M]. 北京：人民交通出版社.1982.
[2] 侯满,曲春升,刘波.马来西亚槟城二桥斜拉桥横隔梁的设计计算方法[J].世界桥梁,2012,40(04):26-29+41.
[3] 董营,刘松.梁格法在城市桥梁设计中的应用研究[J].工程技术研究,2021,6(06):210-211.
[4] 戴公连,李健连.桥梁结构空间分析设计方法与应用[M].北京:人民交通出版社,2010.
[5] 冯卓雄.胜利大桥主桥设计[J].公路与汽运,2006(1):99-101.
[6] 张剑,叶见曙,赵新铭.薄壁箱型结构位移参数的动态 Bayes 随机估计[J].华中科技大学学报（城市科学版）,2006,23(1):66-70.

铰接	-25%~+12%	完全丢失
半刚性（k=0.7）	± 5%	捕捉率 85%

3.3 特殊桥型划分的敏感性

（1）宽桥（ $B/L>1$ ）：考虑剪力滞效应时，横向梁格间距宜控制在 $B/10$ 以内，否则翼缘应力可能低估约 40%。增设纵向虚拟梁有助于提高计算精度，每增加一道虚拟梁，应力误差约降低 7%。（2）多跨连续梁桥：中支点负弯矩区宜进行双向加密，纵向间距不大于 $0.1L$ ，横向间距不大于 $0.2B$ ，否则曲率计算误差可能超过 12%。对于支点刚度突变部位，通常采用过渡单元进行处理。（3）拱桥与斜拉桥：在吊杆或索锚固区，粗网格划分可能导致索力分布误差达到 18%~25%。当局部应力梯度超过 50 MPa/m 时，宜采用三级子网格进行加密：

- 一级网格（全局）：1~2 m；
- 二级网格（锚固区）：0.3~0.5 m；
- 三级网格（接触面）：0.1 m + 实体单元嵌入。

4 结论

本文系统研究了梁格法在桥梁设计分析中的应用，得出以下主要结论：

（1）适用性与计算精度：梁格法在宽桥设计过程中计算精度较高，误差可控制在 $\leq 8\%$ ，明显优于刚性横梁法、刚接板（梁）法等传统方法。对于斜桥（斜交角 $\theta \leq 45^\circ$ ）和曲线桥（曲率半径 $R \geq 2L$ ），通过修正横向和抗扭刚度，可以有效模拟弯扭耦合效应。（2）梁格划分原则的关键影响：纵向间距需满足横向误差指数衰减关系（ $n \geq 5B/L$ ），方便控制弯矩误差在 $\leq 5\%$ ；轴线错位 1% 跨度时，连续梁桥中支点弯矩偏差可达 8.3%。横向虚拟梁刚度偏差 $> 20\%$ 时，横向弯矩误差突破 10%，半刚性连接（刚度系数 $k=0.7$ ）可将误差控制在 $\pm 5\%$ ，并捕捉 85% 的剪力滞效应。（3）特殊桥型的划分要求：宽桥（ $B/L > 1$ ）需加密横向网格（间距 $\leq B/10$ ）以避免翼缘应力低估 40%，每增加 1 道纵向虚拟梁可使应力误差下降 7%。拱桥与斜拉桥的吊杆/索锚固区需采用三级子网格（全局 1~2m→锚固区 0.3~0.5m→接触面 0.1m + 实体单元嵌入），减少索力分布误差。