

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2013.06.009

钢桁架梁桥结构两层面承载力分析和优化

杨绿峰^{1,2}, 李琦¹, 张伟¹

(1. 广西大学工程防灾与结构安全教育部重点实验室, 南宁 530004;

2. 广西壮族自治区住房和城乡建设厅, 南宁 530028)

摘要:基于弹性模量缩减法建立了钢桁架梁桥构件安全系数和结构整体安全系数的便捷计算方法,进而提出了结构两层面安全分析和优化方法。首先引入广义屈服准则考虑组合内力作用,根据能量守恒原则确定单元弹性模量缩减策略,利用线弹性有限元法开展迭代计算,求得各迭代步单元承载比,利用迭代首步和末步结果分别确定钢桁架梁桥构件层面和结构层面的安全系数,根据迭代过程各单元承载比的变化,识别高承载构件和低承载构件,据此开展钢桁架梁桥两层面安全分析。结合两层面安全系数之间的定量关系,通过调整高承载和低承载构件的截面强度,使钢桁架梁桥的承载状态和材料消耗得到优化。算例分析表明,该方法具有较高的计算精度,而且能够通过线弹性方法实现复杂结构的安全分析与结构优化,避免了繁琐的非线性分析和优化计算过程。

关键词:钢桁架梁桥;两层面安全分析;结构优化;弹性模量缩减法;广义屈服准则

中图分类号:U441 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2013)06-0051-07

Two-level Safety Evaluation and Structural Optimization of Steel Truss Bridge

Yang Lufeng^{1,2}, Li Qi¹, Zhang Wei¹

(1. Key Laboratory of Disaster Prevention and Structural Safety of Ministry of Education, Guangxi University,

Nanning 530004, P. R. China; 2. Department of Housing and Urban-Rural Development,

Guangxi Autonomous Zhuang Region, Nanning 530028, P. R. China)

Abstract: A robust method for determining the component safety factor and structural safety factor of steel truss bridge is developed based on elastic modulus reduction method (EMRM). A procedure of two-level safety analysis and structural optimization is presented by means of the linear FEA iteration and the generalized yield criterion to take multiple internal forces into consideration. The strategy of elastic modulus adjustment is derived according to the principle of conversation of energy. The element bearing ratio (EBR) in every step can be obtained, and the first and last EBRs are employed to determine component safety factor and the structural safety factor for two-level structural safety evaluation of steel truss bridge. Those components with higher or lower EBR than the referenced EBR can be identified. By taking the quantitative relationship of the two level safety factors, a structural optimization scheme with better distribution of the EBR and saving material consumption can be achieved by adjusting the sectional strength of components with higher and lower EBR. Numerical examples show that the proposed method is promising with satisfying accuracy. The analysis of structural safety and optimization can be implemented

收稿日期:2012-10-06

基金项目:国家自然科学基金(51168003,51169003);广西自然科学基金重大项目(2012GXNSFEA53002)及主席基金项目(2010GXNSFD169008)

作者简介:杨绿峰(1966-),男,教授,博士生导师,主要从事工程结构的安全性和耐久性研究,(E-mail) lfyang@gxu.edu.cn。

by using the linear iteration while complicated nonlinear analysis in classical scheme is avoided.

Key words: steel truss bridge; two-level safety evaluation; structural optimization; elastic modulus reduction method; generalized yield criterion

钢桁架梁桥因具有构造简单、承载能力高、纵向与横向刚度大、施工周期短等优点,已在钱塘江大桥、南京长江大桥和武汉长江大桥等特大型桥梁工程中得到应用。而钢桁架梁桥也具有跨度大和受力复杂的特点,一旦失效将造成重大人员和财产损失,因此需要重视其安全性。桥梁结构目前主要在考虑各类影响系数的基础上,通过比较构件截面内力和抗力分析结构安全性^[1-4],属于构件层面的安全分析方法。这类方法尽管简便实用,但不能从结构整体承载状态和失效模式上把握各个构件对结构整体安全性的贡献,难以优化结构的承载力分布和材料消耗。为此,有必要从结构层面开展整体安全分析。当前已有一些成果开展了桥梁结构极限承载力研究^[5-7],据此分析结构整体安全性。然而,这种方法没有揭示构件安全性与整体安全性之间的定量关系,与结构设计规范的基本思路仍存在一定差距。因此,单独从构件层面或结构层面进行安全分析均存在不足,有必要同时掌握构件和结构两层面各自的承载状态和安全余量,并根据两层面之间的定量联系进行安全分析及结构优化。

在桥梁结构安全分析中,确定构件层面和结构层面的极限承载力是问题的关键。考虑到要模拟结构失效中的非线性行为,弹塑性增量法 (EPIM) 是最为常用的结构极限承载力计算方法,其正确性得到了实验结果的验证^[6,8]。EPIM 相对成熟、可信,常用于检验其他数值方法的适用性,但原理较为复杂,需采用增量加载方式追踪结构失效路径,对大型复杂结构的分析计算效率不高。最近 20 年发展起来的弹性模量调整法,依据线弹性有限元法求解各构件的承载状态和结构整体的极限承载力,克服了非线性方法的缺陷,具有良好的计算精度和效率,得到了广泛应用^[9-11]。近年提出的弹性模量缩减法 (EMRM)^[12] 是弹性模量调整法的发展,该方法给出了基于单元承载比和应变能守恒原则的新弹性模量调整策略,可通过引入广义屈服准则考虑截面所有内力组合效应对构件失效的影响,通过缩减高承载构件的弹性模量及线弹性有限元迭代计算,在结构中形成一系列静力容许内力场,模拟构件和结构渐次失效的过程,据此求解结构极限承载力。该方法简便实用,具有较高的计算精度和效率,能准确反映构件及结构整体的承载状态和安全余量,并已应用

于复杂结构的极限分析^[13]、安全评估^[14]和可靠度分析中^[15],其迭代计算过程和计算结果可同时为构件和结构两个层面的安全分析奠定基础。

笔者结合钢桁架梁桥,开展基于 EMRM 的桥梁结构两层面安全分析和结构优化研究。首先利用广义屈服准则建立钢桁架梁桥构件在组合内力下的单元承载比,然后利用 EMRM 迭代计算的首步结果得到构件单元承载比和构件安全系数,利用末步迭代结果求得结构极限承载力和结构整体安全系数;根据迭代计算过程中单元承载比的变化,可识别桥梁结构中的高承载和低承载构件;进而结合构件安全系数和结构整体安全系数分析桥梁结构的安全性,同时通过调整高承载和低承载构件的截面强度,开展结构优化研究。

1 极限分析的弹性模量缩减法

1.1 广义屈服准则和单元承载比

图 1 所示的梁单元,在截面所有内力组合作用下的广义屈服准则为:

$$f \leq 1 \quad (1)$$

式中 f 是广义屈服函数,当考虑材料按 Mises 屈服准则破坏时,可采用 Gendy^[16]建立的表达式:

$$f = f_x^2 + f_y^2 + f_z^2 + \frac{1}{\lambda_y} m_y^2 + \frac{1}{\lambda_z} m_z^2 + m_w^2 + m_x^2 \quad (2)$$

式中:

$$f_x = \frac{F_x}{F_{px}}, f_y = \frac{F_y}{F_{py}}, f_z = \frac{F_z}{F_{pz}}, m_x = \frac{T_x}{T_{px}}$$

$$m_y = \frac{M_y}{M_{py}}, m_z = \frac{M_z}{M_{pz}}, m_w = \frac{M_w}{M_{pw}}$$

式中: F_x 、 F_y 、 F_z 、 T_x 、 M_y 、 M_z 和 M_w 分别表示梁截面上的内力;带有下标 p 的物理量表示截面强度,也称为全截面屈服内力;小写符号 f_x 、 f_y 、 f_z 、 m_x 、 m_y 、 m_z 和 m_w 表示无量纲内力; λ_y 和 λ_z 是与截面有关的特征参数,对于矩形截面有: $\lambda_y = \lambda_z = 1 - f_x^2$ 。

广义屈服函数 f 反映了构件在内力组合效应下的承载状态和临近屈服的程度,当 $f = 1$ 时,相应的构件截面将出现塑性铰。据此定义单元承载比 r^e :

$$r^e = \sqrt{f} \quad (3)$$

单元承载比^[12]是一个融合了构件截面内力和强度的综合指标,表征了离散单元在复杂受力状态

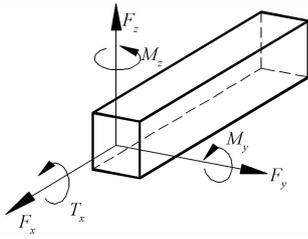


图1 梁单元内力示意

下接近于塑性失效的程度,能反映内力组合效应对构件失效的影响机理,是 EMRM 进行单元弹性模量调整的无量纲控制参数。

1.2 单元承载比均匀度和基准承载比

定义单元承载比均匀度 d_k :

$$d_k = \frac{\bar{r}_k + r_k^{\min}}{r_k^{\max} + r_k^{\min}}, r_k^- = \frac{1}{N} \sum_{e=1}^N r_k^e \quad (4)$$

式中: N 表示结构离散单元总数;下标 k 表示迭代步; \bar{r}_k 表示结构全部单元承载比的平均值; r_k^{\max} 和 r_k^{\min} 分别表示结构中单元承载比的最大和最小值:

$$r_k^{\max} = \max(r_k^1, r_k^2, \dots, r_k^N);$$

$$r_k^{\min} = \min(r_k^1, r_k^2, \dots, r_k^N)$$

定义基准承载比 r_k^0 :

$$r_k^0 = r_k^{\max} - (r_k^{\max} - r_k^{\min}) \cdot d_k \quad (5)$$

基准承载比是判别高承载单元的动态阈值,当单元承载比大于 r_k^0 时,属于高承载单元,该单元的弹性模量将被缩减。

1.3 弹性模量调整策略

根据能量守恒原则,弹性模量缩减前的单元变形能等于弹性模量缩减后的单元变形能与耗散的变形能之和。由此可以推导弹性模量调整策略^[12-13]:

$$E_{k+1}^e = \begin{cases} E_k^e \frac{2(r_k^0)^2}{(r_k^e)^2 + (r_k^0)^2}, & r_k^e > r_k^0 \\ E_k^e, & r_k^e \leq r_k^0 \end{cases} \quad (6)$$

1.4 极限荷载求解

塑性极限理论中外荷载可用向量表示为:

$$\{P\} = P^0 [P_1, P_2, \dots, P_n]^T \quad (7)$$

式中: P_1, P_2, \dots, P_n 代表结构承受的 n 个外荷载,取其真实值; P^0 表示荷载乘子,取 $P^0 = 1$,是荷载乘子的初始值。

线弹性有限元迭代计算中,每个迭代步都形成一个静力容许的内力场,并存在一个与之相应的极限荷载值^[12]:

$$P^k = P^0 / r_k^{\max} \quad (8)$$

式中 P^k 表示第 k 迭代步的荷载乘子极限值。

重复迭代计算,直到满足收敛准则:

$$\left| \frac{(P^{k+1} - P^k)}{P^k} \right| \leq \epsilon \quad (9)$$

式中 ϵ 表示收敛容差,文中取 0.001。

若迭代 M 次收敛,则结构极限荷载的下限为:

$$P_L = P^M = P^0 / r_M^{\max} \quad (10)$$

2 构件和结构两层面安全分析方法

2.1 构件层面安全分析

根据 EMRM 首步迭代计算结果,利用式(3)获取钢桁架梁桥各构件在设计荷载作用下的单元承载比 r_1^e ,进而求得构件安全系数:

$$K_S^e = \frac{1}{r_1^e} \quad (11)$$

式中 K_S^e 表示构件单元 e 的安全系数,反映了内力组合效应下构件的安全储备状况。

根据 K_S^e 从构件层面进行桥梁结构承载力安全评估。当 $\min(K_S^e) > 1$ 时,表明各构件均未失效。反而当某构件的 $K_S^e \leq 1$ 时,该构件将会进入承载力极限状态。通常结构设计要求预留一定的安全余量,不允许 K_S^e 过于接近 1。

2.2 结构层面安全分析

根据 EMRM 的最后一步弹性迭代分析结果求得结构极限荷载 P_L ,进而,结合式(10)可得结构整体安全系数:

$$K_T = \frac{P_L^0}{P} = \frac{1}{r_M^{\max}} \quad (12)$$

式中 K_T 为结构整体安全系数或结构安全系数,能反映桥梁结构整体承载状态和安全储备状况。

根据 K_T 可以从结构层面评估桥梁的整体安全性。当 $K_T > 1$ 时,表明结构在当前承载状态下不会形成整体失效模式。反而,当 $K_T \leq 1$ 时,表明结构进入承载力极限状态,将发生失效。因此要求结构安全系数不能过于接近 1,从而保障结构整体具有一定的安全余量。

从式(12)可以看出,根据 EMRM 末步迭代中单元承载比 r_M^{\max} 最大的构件,可求得结构整体安全系数 K_T ,据此判断结构整体安全性。由此可以看出,结构承载力与构件承载力密切相关,根据二者之间的关联,可以基于造价和安全两方面的考虑,得到优化的结构设计或维护加固方案。

3 钢桁架梁桥的安全分析和结构优化

结合算例说明两层面安全分析方法在钢桁架梁桥结构设计或维护加固方案优化中的应用。

3.1 算例 1:简支钢桁架梁桥

图 2 所示下承式简支钢桁架梁桥,道路等级为二级,双车道,跨度 $5 \times 8 \text{ m} = 40 \text{ m}$,高 5 m,宽 8 m,

共有 98 根杆件,杆件截面几何参数如表 1。采用线弹性有限元进行弹性迭代分析,A 类构件为螺栓连接系杆,承受轴力作用,采用杆单元模拟,其余杆件承受组合内力作用,需采用梁单元模拟。材料屈服强度 345 MPa,弹性模量为 210 GPa,泊松比为 0.3。荷载工况为全桥满跨均布荷载 15.75 kN/m,跨中作用集中荷载 480 kN。

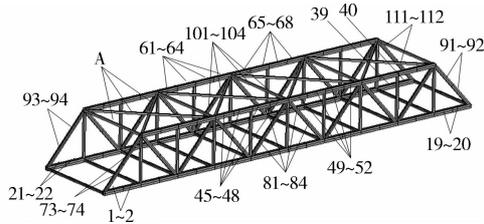


图 2 下承式简支钢桁架梁桥

表 1 杆件截面几何参数

杆件类别	构件单元编号	截面面积/m ²	截面惯性矩/m ⁴
下弦杆	1~40	1.20×10^{-2}	1.44×10^{-5}
上弦杆	41~72	1.20×10^{-2}	1.44×10^{-5}
斜腹杆	73~148	6.40×10^{-3}	3.41×10^{-6}
横梁	149~170	4.80×10^{-3}	2.56×10^{-6}
系杆	171~183	4.80×10^{-3}	

3.1.1 结构两层面安全分析 根据 EMRM 首步迭代计算结果可求得各单元承载比,然后根据式(11)可以求得相应的安全系数,表 2 列出了部分构件分别考虑单一内力或多内力组合作用时的安全系数,图 3 给出其单元承载比迭代过程。其中,第 1、2 组是钢桁架桥两端外侧的斜腹杆;第 3 组是桥中间的 8 根上弦杆;第 4 组是钢桁架桥两端外侧的下弦杆;第 5 组是跨中的斜腹杆。这些构件的位置如图 2 所示。

表 2 构件安全系数

组号	构件单元号	构件安全系数		
		内力组合作用	仅考虑轴力	仅考虑弯矩
1	73,91,93,111	4.01	4.21	13.51
2	74,92,94,112	4.15	4.21	26.45
3	45~52,61~68	4.59	4.59	135.51
4	1~2,19~22,39~40	5.06	11.69	5.63
5	81~84,101~104	11.40	11.42	176.82

EMRM 首步迭代计算结果显示,钢桁架桥全部

构件的安全系数均大于 4,表明了结构设计满足承载安全要求,在正常状况下不会发生结构失效。同时可见,仅考虑轴力或弯矩作用时,截面安全系数均大于内力组合作用时的截面安全系数,而且部分结果差别非常显著。因此,仅考虑单一内力进行安全评估时,可能导致评估结论不可靠。

根据 EMRM 迭代末步的计算结果可求得最大单元承载比,代入式(10)求得桥梁极限承载力 $P_L = 66.46$ kN/m。该结果与 EPIM 得到的极限承载力 67.08 kN/m 之间相差不到 1%,验证了 EMRM 在钢桁架桥梁极限承载力分析和失效模式预测中的有效性。根据式(12)可求得结构整体安全系数:

$$K_T = \frac{1}{r_M^{\max}} = \frac{P_L}{P^0} = \frac{66.46}{15.75} = 4.22$$

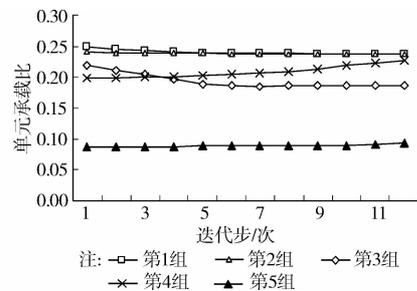


图 3 构件单元承载比的迭代过程

结合构件安全系数和结构整体安全系数可见,该工况下该桥梁在构件层面和结构层面均保持一定的安全储备,不会发生局部失效或整体失效。同时根据迭代过程中各构件单元承载比的变化情况可知,钢桁架桥的全部横梁、单元编号为 171~183 的系杆、桥梁两端单元编号为 41~44、53~60 和 69~72 的上弦杆、远离桥梁两端单元编号为 113~148 的斜腹杆、单元编号为 5~8、13~16、25~28 和 33~36 的下弦杆等构件,其单元承载比从迭代计算的首步到末步始终较低,对结构整体承载能力贡献较小。另一方面,通过表 2 和图 3 可以看出,从迭代过程的首步到末步,第 1、2 组单元始终处于高承载状态,它们尽管数量不大,但对桥梁结构的承载力和安全性起着控制作用。因此,可通过调整上述低承载和高承载构件,优化桥梁结构的承载状态,降低材料消耗。

3.1.2 基于两层面安全分析的结构优化 根据桥梁在构件和结构两层面的承载力和安全系数分析,可以看出结构中存在大量的低承载构件,这些构件自身安全余量大,且对结构整体安全度贡献不大;同时,结构中的高承载构件尽管数量少,但对结构整体安全性起到了控制作用。因此可以通过减小低承载

构件的截面强度、减少其安全余量的方法,使结构中承载比分布更加均匀,从而优化结构受力状况,且能够在保持结构整体承载力不降低的前提下降低造价。另一方面,通过提高具有控制作用的部分高承载构件的截面强度,可以较大幅度提高桥梁结构的整体安全度,而且工程造价仅有少许增加。

首先通过减小低承载构件的截面强度(笔者采用降低截面几何尺寸的方法)进行结构优化,针对3.1.1节末段给出的单元承载比从迭代首步到末步始终较低的构件,包括横梁、系杆和部分斜腹杆、上下弦杆等,按照如下方案调整构件截面强度:

方案1:仅调整横梁及系杆;

方案2:调整横梁、系杆及斜腹杆;

方案3:调整横梁、系杆、斜腹杆和上弦杆;

方案4:全部承载比较低的5类杆件。

在保证构件长细比满足规范要求的前提下,按以上4个方案依次调整后的杆件截面尺寸如表3所示。按照4种方案调整后的桥梁结构,结构整体安全系数均保持为4.22,而结构的承载比均匀度 d_k 从调整前的0.34分别提高至0.36、0.38、0.39及0.41,图4给出了各方案下承载比均匀度的迭代过程,可见结构承载比均匀度沿方案顺序提高,表明各调整方案的构件对结构整体承载力贡献度不断均匀化,大部分构件都能较好发挥材料强度。调整后能显著减少结构耗材,4个方案分别可节省9.46%、15.37%、18.44%、21.28%的用钢量。另外也可以采取减小低承载构件材料强度的方法进行调整,其效果与上述方案相似,这里不再赘述。

表3 调整后杆件截面几何参数

杆件类别	构件单元号	截面面积/ m^2	截面惯性矩/ m^4
横梁	149~170	4.20×10^{-3}	1.72×10^{-6}
系杆	171~183	2.50×10^{-3}	
斜腹杆	113~148	3.60×10^{-3}	1.08×10^{-6}
上弦杆	41~44, 53~60, 69~72	8.10×10^{-3}	5.47×10^{-6}
下弦杆	5~8, 13~16, 25~28, 33~36	9.00×10^{-3}	7.50×10^{-6}

另外,也可以通过提高部分高承载构件的截面强度,达到优化结构受力性能和增大结构整体安全度的目标。由表2和图3可见,前2组共8个构件的承载比在迭代中始终较高,安全系数相对较小,在加载过程中将首先进入塑性极限状态,现将这2组8个构件的截面增大至面积 $8.10 \times 10^{-3} m^2$ 和惯性矩 $5.47 \times 10^{-6} m^4$ 。图5给出了调整前后承载比均

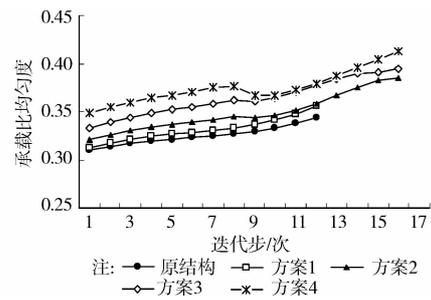


图4 承载比均匀度迭代过程

匀度和最大单元承载比的变化,可见承载比均匀度得到提高,同时最大单元承载比降低,也就是说,各构件对整体承载能力的贡献度更加均匀化,所以结构的受力更加合理。利用EMRM的末步迭代结果,求得结构的整体安全系数从调整前的4.22提高到5.13,增大21.56%,而结构用钢量仅增加了1.04%。

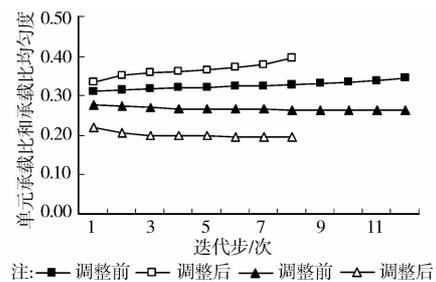


图5 材料调整前后的承载比

在增大上述2组8个高承载构件截面强度的同时,结合前述方案1,降低部分低承载构件的截面强度,则可得更为优化的结构方案。根据该优化方案,利用EMRM求得结构的整体安全系数,从原设计方案的4.22提高到现方案的4.75,增大12.56%,同时结构总用钢量降低6.88%。

3.2 算例2:三跨下承式钢桁架梁桥

图6所示三跨钢桁架梁桥,道路等级为一级,双车道,跨度 $3 \times 80 m = 240 m$,高8 m,宽10 m。杆件截面几何参数如表4。材料屈服应力345 MPa,弹性模量210 GPa,泊松比0.3。载荷工况考虑第1及第3跨满布均布荷载,大小为21 kN/m。

表4 杆件截面几何参数

杆件类别	杆件号	截面面积/ m^2	截面惯性矩/ m^4
下弦杆	1~96	1.80×10^{-2}	3.38×10^{-5}
上弦杆	97~144	1.20×10^{-2}	1.44×10^{-5}
腹杆	145~241	1.00×10^{-2}	8.33×10^{-6}

3.2.1 结构两层安全分析 根据EMRM首



图 6 三跨钢桁架梁桥

步迭代计算结果可求得各单元承载比和相应的安全系数,表 5 列出了部分构件分别考虑单一内力或多内力组合作用时的安全系数,图 7 给出其单元承载比迭代过程,这些构件的位置如图 6。其中,第 1 至第 4 组是钢桁架桥第 1 和第 3 跨中的上弦杆;第 5 组是靠近桥两端支座的下弦杆;第 6 组是第 2 跨的所有上弦杆。首步迭代结果显示,该工况下钢桁架桥全部构件的安全系数均大于 2,表明结构设计满足承载安全,在正常状况下不会发生结构失效。

表 5 构件安全系数

组号	构件单元号	构件安全系数		
		内力组合作用	仅考虑轴力	仅考虑弯矩
1	104~105, 136~137	2.40	2.40	112.90
2	102~103, 138~139	2.45	2.45	108.55
3	106~107, 134~135	2.76	2.76	102.04
4	108~109, 132~133	4.08	4.08	100.60
5	1,96	6.05	10.57	7.42
6	112~129	5.49	5.49	275.50

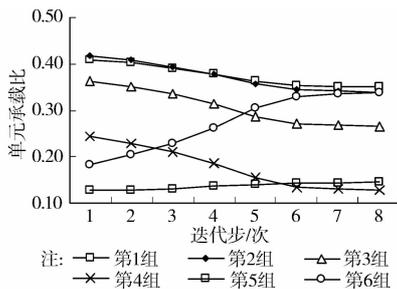


图 7 构件单元承载比的迭代过程

根据末步迭代结果可求得该钢桁架梁桥的极限承载力 $P_L = 60.03 \text{ kN/m}$,与 EPIM 得到的梁桥极限承载力 60.34 kN/m 基本吻合。所以,钢桁架梁桥的结构整体安全系数为:

$$K_T = \frac{1}{r_M^{\max}} = \frac{P_L}{P^0} = \frac{60.03}{21.0} = 2.86$$

结合构件安全系数和结构整体安全系数可见,该桥梁在构件和结构层面均能保持一定的安全储备,不会发生局部失效或整体失效。同时根据迭代过程中各构件单元承载比的变化情况可知,钢桁架

桥的全部腹杆、单元编号为 97~99、108~111、130~133、142~144 的上弦杆、单元编号为 1~29、31~66 和 68~96 的下弦杆等构件,单元承载比从迭代首步到末步始终较低,对结构整体承载能力贡献较小。另一方面,通过表 5 和图 7 可以看出,从迭代过程的首步到末步,第 1、2 组单元始终处于高承载状态,它们尽管数量不大,但对桥梁结构的承载力和安全性起着控制作用。因此,可通过调整上述低承载和高承载构件,优化桥梁结构的承载状态,降低材料消耗。

3.2.2 基于两层面安全分析的结构优化 根据前述构件和结构两层面安全分析,通过减小低承载构件的截面强度或提高部分高承载构件的截面强度进行结构优化。

首先通过降低截面强度的方法优化结构承载状态。在保证构件长细比满足规范要求的前提下,减小了表 4 所列的腹杆和下弦杆截面几何尺寸,如表 6 所示。调整后的桥梁结构整体安全系数仍为 2.86,结构的承载比均匀度 d_k 从调整前的 0.27 提高到 0.31,整体承载性能更趋合理,且可节省 19.38% 的用钢量。

表 6 调整后杆件截面几何参数

类别	单元号	截面面积/ m^2	截面惯性矩/ m^4
腹杆	145~241	9.00×10^{-3}	7.50×10^{-6}
下弦杆	1~28, 31~66 69~96	1.44×10^{-2}	1.73×10^{-5}

另一方面,通过增大部分高承载构件的截面强度,也可以优化结构受力性能,从而增大结构整体安全度。将该桥梁所有上弦杆的截面增大,其面积和惯性矩分别为 $1.80 \times 10^{-2} \text{ m}^2$ 和 $3.38 \times 10^{-5} \text{ m}^4$ 。EMRM 计算结果表明,调整后的结构承载比均匀度得到提升,而最大单元承载比明显降低,如图 8 所示。各构件对结构承载能力的贡献度更加均匀,结构的承载状态更趋合理。结构整体安全系数从调整前的 2.86 提高到 3.85,增大 34.62%,而结构用钢量仅增加了 8.30%。

4 结论

提出了钢桁架梁桥两层面安全分析方法,可以采用弹性模量缩减法求解桥梁结构的构件安全系数和整体安全系数,进而从构件和结构两个层面分析钢桁架梁桥的安全性。该方法将广义屈服准则和弹性模量缩减法引入钢桁架梁桥的安全分析中,考虑了组合内力对结构安全性的影响,克服了依据单一

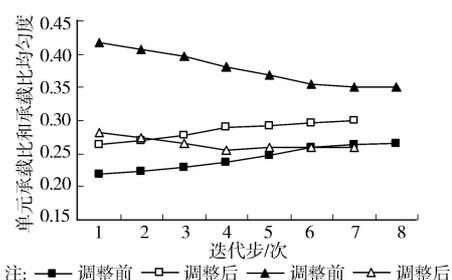


图8 材料调整后的承载比

内力评估结构安全时可能导致偏于不安全的问题。同时,该方法结合两层面安全系数之间的定量关系,可以在迭代分析过程中识别出高承载和低承载构件,通过调整这些构件的截面强度,优化桥梁结构的承载状态,提高结构承载力,降低材料消耗,为桥梁设计、评估和维护加固提供新途径。

需要说明的是,研究工作仅考虑了强度要求,下一步将综合考虑强度、刚度、稳定性以及耐久性等方面的要求,开展工程结构两层面安全分析和优化研究。

参考文献:

- [1] 中交公路规划设计院. JTG D 60—2004 公路桥涵设计通用规范 [S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2004.
- [2] 交通运输部公路科学研究院. JTG/T J 21—2011 公路桥梁承载能力检测评定规程 [S]. 北京:人民交通出版社, 2011.
- [3] 交通运输部公路科学研究院. JTG/T H 21—2011 公路桥梁技术状况评定标准 [S]. 北京:人民交通出版社, 2011.
- [4] 李亚东. 基于设计规范的桥梁承载能力评估[J]. 桥梁建设, 1996, 26(2): 61-63.
Li Y D, Code-based assessment for load-carrying capacity of bridge structures [J]. Bridge Construction, 1996, 26(2): 61-63.
- [5] Cheng J, Jiang J J, Xiao R C, et al. Ultimate load carrying capacity of the Lu Pu steel arch bridge under static wind loads [J]. Computers and Structures, 2003, 81(2): 61-73.
- [6] Ying X, Kuang J S. Ultimate load capacity of cable-stayed bridges [J]. Journal of Bridge Engineering, 1999, 4(1): 14-22.
- [7] Yan D, Chang C C. Vulnerability assessment of single-pylon cable-stayed bridges using plastic limit analysis [J]. Engineering Structures, 2010, 32(8): 2049-2056.
- [8] Thimmhardy E G, Marsh C, Chen H, et al. Nonlinear analysis of steel and concrete bridge components [J]. Computers & Structures, 1995, 56(2/3): 439-459.
- [9] Mackenzie D, Boyle J T, Hamilton R. The elastic compensation method for limit and shakedown analysis: a review [J]. Journal of Strain Analysis for Engineering Design, 2000, 35(3): 171-188.
- [10] Adibi-Asl R, Seshadri R. Local limit-load analysis using m_p method [J]. Journal of Pressure Vessel Technology, 2007, 129(2): 296-305.
- [11] Chen L J, Liu Y H, Yang P, et al. Limit analysis of structures containing flaws based on a modified elastic compensation method [J]. European Journal of Mechanics-A: Solids, 2008, 27(2): 195-209.
- [12] Yang L F, Yu B, Qiao Y P. Limit bearing capacity analysis of frame using elastic modulus reduction method [J]. Acta Mechanica Solida Sinica, 2009, 22(2): 109-115.
- [13] Yu B, Yang L F. Elastic modulus reduction method for limit analysis of thin plate and shell structures [J]. Thin Walled Structures, 2010, 48(4/5): 291-298.
- [14] Yang L F, Zhang W, Yu B, et al. Safety evaluation of branch pipe in hydropower station using elastic modulus reduction method [J]. Journal of Pressure Vessel Technology, 2012, 134(6): 1-7.
- [15] Yang L F, Yu B, Ju J W. System reliability analysis of spatial variance frames based on random field and stochastic elastic modulus reduction method [J]. Acta Mechanica, 2012, 223(1): 109-124.
- [16] Gendy A S, Saleeb A F. Generalized yield surface representations in the elasto-plastic three-dimensional analysis of frames [J]. Computers and Structures, 1993, 49(2): 351-362.

(编辑 胡英奎)