

文章编号:1673-2049(2009)04-0035-05

## 工字型钢-混凝土连续组合梁 腹板局部稳定性分析

蒋丽忠, 刘海峰, 李 兴

(中南大学 土木建筑学院, 湖南 长沙 410075)

**摘要:**对工字型钢-混凝土连续组合梁负弯矩区腹板在复合应力作用下的力学性能进行了研究,提出了工字型组合梁腹板在复合应力作用下的局部稳定性计算模型,建立了相应的临界屈曲应力计算公式;基于组合梁腹板的稳定性特点和偏心受压与剪切作用下的相关方程,计算了工字型组合梁腹板在复合应力状态下的弹性屈曲因数,采用势能驻值原理分析得出了连续组合梁负弯矩区腹板稳定的临界应力,提出了弹性受力阶段腹板不设横向加劲肋的高厚比限值。计算结果表明:该计算方法有广泛的适用性,且大部分情况下可以放宽对高厚比的限制,为工字型组合梁负弯矩区腹板的合理优化设计提供了参考。

**关键词:**工字型钢-混凝土连续组合梁;腹板;承载力;失稳模型;局部稳定性

中图分类号:TU398

文献标志码:A

## Local Stability of I-section Steel-concrete Continuous Composite Beam Web

JIANG Li-zhong, LIU Hai-feng, LI Xing

(School of Civil Engineering and Architecture, Central South University, Changsha 410075, Hunan, China)

**Abstract:** The mechanical behaviors of continuous composite beam web in negative moment area under the load of complicated stress were studied, and the calculation model of local stability under the load of complicated stress was proposed, meanwhile, the corresponding calculation formulas of limited buckling stress were built. Based on the stability characteristics of composite beam web, according to the relevant equations under the action of eccentric compression and shear, the elastic buckling factors of I-section composite beam web under the complicated stress state were calculated. Furthermore, using potential energy principle, the limited stresses of continuous composite beam web in negative moment area were analyzed, and the limiting height to thickness ratio was also determined for webs without stiffing ribs in the elastic stage. The calculated results show that the method has broad applicability, and in most cases, the restrictions of height to thickness ratio can be relaxed, and it can provide reference for the reasonable optimization design of I-section composite beams web in negative moment area.

**Key words:** I-section steel-concrete continuous composite beam; web; bearing capacity; instability model; local stability

收稿日期:2009-07-05

基金项目:国家自然科学基金项目(50778177);湖南省杰出青年基金项目(07JJ1009)

作者简介:蒋丽忠(1971-),男,湖南衡山人,教授,博士研究生导师,工学博士,E-mail:lzhjiang@mail.csu.edu.cn。

## 0 引言

组合受弯构件中的钢梁通常是由钢板组成的工字型、箱型、T 型等实腹式构件,如果板件的宽厚比太大,在一定荷载条件下,在构件尚未整体失稳时,个别板件可能不能保持其平面平衡状态而发生平面外的波形凸曲现象,这种现象称为组合梁的局部板件丧失稳定,简称局部失稳(屈曲)<sup>[1-3]</sup>。受弯构件的腹板局部失稳,可能导致构件的整体失稳提前发生,因此,在钢-混凝土组合梁构件设计时,必须保证腹板的局部稳定。

文献[3]中利用截面延性曲率  $k_1$ 、 $k_2$  可以用截面柔度当量  $\lambda_c$  表达的特点并结合结构力学和数值迭代法,求解了 36 组不同情况下的连续组合梁稳定情况。通过分析认为:第 2 类组合梁截面的局部失稳可采用支座处弯矩调幅值取为 30% 来等效,并可避免复杂的弹塑性分析计算。对于钢-混凝土组合梁腹板,有可能发生复合应力(主要包括截面绝大部分的剪应力  $\tau$ 、弯曲正应力  $\sigma$  以及可能存在的横向压应力  $\sigma_c$ )作用下的局部失稳问题,目前中国尚没有专门的组合结构规范,组合梁的局部稳定设计主要沿用钢梁的设计方法,组合梁和纯钢梁在腹板的受力特性上有所区别,套用纯钢梁的设计方法具有不合理性,因此,对组合梁腹板的稳定问题进行分析研究是非常必要的。

笔者主要对工字型连续组合梁负弯矩区腹板的力学性能进行研究,提出了工字型组合梁腹板稳定性计算的简化模型,并根据组合梁腹板稳定问题的特点,用势能驻值原理分析得出了腹板稳定的临界应力,探讨了组合梁在弹性受力阶段钢梁腹板不设横向加劲肋的高厚比限值。

## 1 计算模型及屈曲条件

连续组合梁内支座负弯矩区所受到的弯矩、剪力及轴向压力沿梁长度方向均发生变化,且一般情况下由剪力引起的弯矩梯度较大<sup>[4]</sup>。为简化分析,可以偏安全地假定:整个计算区域或一个腹板区格内都按最不利截面的内力进行计算,并令弯矩、剪力和轴向压力保持为常量。此外,组合梁上翼缘处的局部压应力由于混凝土板的扩散作用而对腹板的影响程度较小;而支座反力对腹板的作用受构造的影响很大,且常通过设置支撑加劲肋来解决,所以本文中未特别考虑局部压应力对腹板屈曲的影响。

根据上述假定可知组合梁腹板屈曲前的应力状

态为:偏心压应力沿腹板高度方向呈线性变化;剪应力均匀分布;各种应力在一个腹板区格内沿梁的长度方向保持恒定。计算模型如图 1 所示,其中,  $T$  为受拉区,  $C$  为受压区。

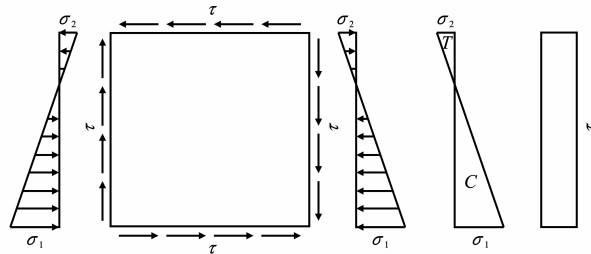


图 1 连续组合梁腹板的计算模型

Fig. 1 Calculation Model of Continuous Composite Beam Web

由图 1 可知,腹板的应力状态由 3 个参数  $\sigma_1$ 、 $\psi$ 、 $\gamma$  决定,其中  $\sigma_1$  为腹板边缘最大压应力,  $\psi$  为最小压应力  $\sigma_2$  与最大压应力  $\sigma_1$  之比,  $\gamma$  为剪应力  $\tau$  与最大压应力  $\sigma_1$  之比。计算时,  $\sigma_1$ 、 $\sigma_2$  都是以压应力为正,拉应力为负。

在弯曲正应力  $\sigma$ 、剪应力  $\tau$  和横向压应力  $\sigma_c$  联合作用下,《钢结构设计规范》(GB 50017—2003)中所采用的薄板局部稳定相关计算公式为

$$\sqrt{\left(\frac{\sigma}{\sigma_{b,cr}} + \frac{\sigma_c}{\sigma_{c,cr}}\right)^2 + \left(\frac{\tau}{\tau_{cr}}\right)^2} \leq 1 \quad (1)$$

式中:  $\sigma_{b,cr}$ 、 $\sigma_{c,cr}$ 、 $\tau_{cr}$  分别为纯弯正应力、局部压应力和纯剪单独作用时腹板的临界应力。

当纯弯与纯剪联合作用时, Timoshenko 等提出了圆弧相关方程为<sup>[5]</sup>

$$\left(\frac{\sigma}{\sigma_{b,cr}}\right)^2 + \left(\frac{\tau}{\tau_{cr}}\right)^2 \leq 1 \quad (2)$$

当不考虑局部压应力的作用时,式(1)与式(2)形式相同。

压弯构件在轴向压力、弯矩和剪力的共同作用下,如果构件失稳时腹板仍处在弹性状态, Chwale 按照图 1 所示腹板在非均匀受压和受剪共同作用下的受力条件,给出了弹性屈曲的近似计算公式为<sup>[6]</sup>

$$\left(\frac{\tau}{\tau_{cr}}\right)^2 + \left(1 - \frac{\alpha}{2}\right) \frac{\sigma}{\sigma_{cr}} + \frac{\alpha}{2} \left(\frac{\sigma}{\sigma_{cr}}\right)^2 \leq 1 \quad (3)$$

式中:  $\alpha$  为腹板的应力梯度,  $\alpha = (\sigma_1 - \sigma_2) / \sigma_1 = 1 - \psi$ ;  $\sigma_{cr}$  为非均匀受压作用时四边简支板的屈曲应力。

根据假定组合梁腹板的受力状态可将腹板受力等效为压弯构件在轴向压力、弯矩和剪力的共同作用。由于式(1)、(2)都是针对纯弯和纯剪联合作用的板件,因此组合梁腹板的屈曲公式采用式(3)才具有较高的准确度。本文中采用式(1)的屈曲条件,

根据钢-混凝土组合梁腹板的实际受力状态来分析连续组合梁腹板的屈曲应力及高厚比限值。

## 2 屈曲应力及高厚比限值

组合梁腹板在非均匀压力作用下,有因受压而发生屈曲的可能性。根据势能驻值原理<sup>[7]</sup>,取挠曲面为二重三角级数的前3项可以得到 $\sigma$ 的屈曲临界值<sup>[8]</sup>为

$$\sigma_{cr} = \frac{\chi_1 k_1 \pi^2 E}{12(1-\nu^2)} \left( \frac{t_w}{h_0} \right)^2 \quad (4)$$

式中: $E$ 为组合梁腹板的弹性模量; $\nu$ 为组合梁腹板的泊松比; $t_w$ 为组合梁腹板的厚度; $h_0$ 为组合梁腹板的有效高度; $\chi_1$ 为组合梁腹板非均匀受压时翼缘对腹板的嵌固系数,可近似取为1.51; $k_1$ 为组合梁腹板非均匀受压时的屈曲系数,当腹板的计算长度 $a > 2h_0/3$ 时,对于非均匀受压、应力梯度为 $\alpha$ 的四边简支板的弹性屈曲系数可由式(5)近似确定,即

$$k_1 = 2\alpha^3 + 2\alpha + 4 \quad (5)$$

欧洲规范 EC3 中通常采用下列简化公式计算屈曲系数 $k_1$ ,它的计算值和理论值差别很小,可用于四边简支板非均匀受压时屈曲系数的计算,其简化计算公式为

$$k_1 = \begin{cases} \frac{8.2}{1.05 + \varphi} & 0 < \varphi \leq 1 \\ 7.81 - 6.29\varphi + 9.78\varphi^2 & -1 \leq \varphi \leq 0 \end{cases} \quad (6)$$

式中: $\varphi$ 为腹板应力梯度。

均匀受剪的四边简支板,在其对角线方向形成斜向压应力,当剪应力增大到一定程度时,会使腹板因受压而屈曲。腹板均匀剪切时临界应力 $\tau_{cr}$ 的计算公式<sup>[9]</sup>可表示为

$$\tau_{cr} = \frac{\chi_2 k_2 \pi^2 E}{12(1-\nu^2)} \left( \frac{t_w}{h_0} \right)^2 \quad (7)$$

式中: $\chi_2$ 为组合梁腹板纯剪时翼缘对腹板的嵌固系数,综合考虑残余应力和初始缺陷的影响后,可近似取为1.23; $k_2$ 为组合梁腹板纯剪时的屈曲系数,可由式(8)近似确定,即

$$k_2 = \begin{cases} 5.34 + 4.0 \left( \frac{h_0}{a} \right)^2 & a \geq h_0 \\ 4.0 + 5.34 \left( \frac{h_0}{a} \right)^2 & a < h_0 \end{cases} \quad (8)$$

当腹板未设横向加劲肋时,腹板的长高比将是很大的,屈曲系数 $k_2$ 可近似取为5.34。

当腹板在复合应力作用下达到临界状态时,可从式(3)得到用边缘弯曲应力 $\sigma$ 表示的腹板弹性屈曲应力 $\sigma_{cr}$ ,其通式可表示为

$$\sigma_{cr} = \frac{k_e \pi^2 E}{12(1-\nu^2)} \left( \frac{t_w}{h_0} \right)^2 \quad (9)$$

式中: $k_e$ 为组合梁腹板在复合应力作用下的屈曲系数。

由式(3)~(9)可以得到屈曲系数 $k_e$ 的表达式为

$$k_e = \chi_1 k_1 \chi_2 k_2 \left[ \sqrt{\left( 1 + \frac{\alpha}{2} \right)^2 \chi_2^2 k_2^2 + 4 \chi_1^2 k_1^2 \gamma^2} - \left( 1 - \frac{\alpha}{2} \right) \chi_2 k_2 \right] / (2 \chi_1^2 k_1^2 \gamma^2 + \alpha \chi_2^2 k_2^2) \quad (10)$$

板件的局部性失稳使得构件的承载力有所减损。在钢结构设计中,对大量构件都采取防止板件失稳的设计对策<sup>[10-16]</sup>。由上述的分析和式(4)~(10)计算可知,防止板件失稳的有效方法是限制它的高厚比。

板件是构件的组成部分,在正常情况下,板件不应先于构件屈曲,其计算过程较复杂,为了使腹板的局部稳定得到最大限度的保证,简单的处理方法是要求腹板的弹性屈曲应力不应小于屈服强度,即确定腹板的高厚比限值时,应使它的屈曲应力至少达到腹板可能受到的最大应力,即

$$\sigma_{cr} = \frac{k_e \pi^2 E}{12(1-\nu^2)} \left( \frac{t_w}{h_0} \right)^2 \geq f_y \quad (11)$$

式中: $f_y$ 为钢材的屈服强度。

由式(11)得到不设横向加劲肋时组合梁负弯矩区的腹板高厚比限值 $\frac{h_0}{t_w}$ 为

$$\frac{h_0}{t_w} \leq \sqrt{\frac{k_e \pi^2 E}{12(1-\nu^2) f_y}} \quad (12)$$

## 3 算例分析

某两等跨连续组合梁,单跨度 $l = 12$  m,构造简图及负弯矩区梁的截面尺寸如图2所示。组合梁全高 $h = 600$  mm,混凝土翼缘板为C40现浇混凝土板,混凝土板厚 $h_c = 100$  mm,混凝土板的有效宽度 $b_e = 500$  mm,钢梁是由3块钢板焊接而成的工字型梁,钢梁高500 mm,钢材为Q235,剪力连接件采用直径为16 mm的圆钉柱头栓钉,混凝土翼缘板横向配筋均采用直径为6 mm的光圆钢筋,沿梁纵向等间距布置,纵向钢筋采用直径为12 mm的光圆钢筋,验算负弯矩区钢梁腹板的局部稳定性。

### 3.1 组合梁负弯矩区强度验算

在连续组合梁支座处的腹板计算高度边缘,同时存在较大的正应力 $\sigma$ 和剪应力 $\tau$ ,应按复合应力状态验算其折算应力,即

$$\sqrt{\sigma^2 + 3\tau^2} \leq \beta_1 f \quad (13)$$

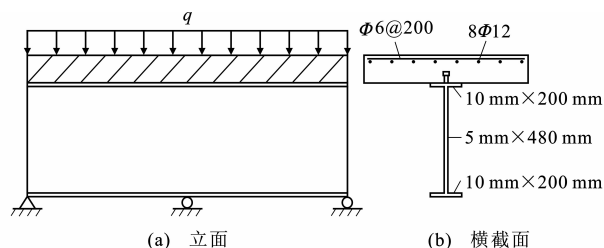


图 2 连续组合梁

Fig. 2 Continuous Composite Beam

式中:  $f$  为钢材的抗拉、抗压和抗弯强度设计值;  $\beta_1$  为计算折算应力的强度设计值增大系数, 当局部压应力为 0 时, 取  $\beta_1 = 1.1$ 。

组合梁腹板下缘最大压应力  $\sigma_1 = 202.58 \text{ MPa} < f = 215 \text{ MPa}$ , 腹板下缘剪应力  $\tau_1 = 34.79 \text{ MPa} < f_v = 125 \text{ MPa}$ ,  $f_v$  为钢材抗剪强度设计值, 折算应力  $\sigma_{eq} = \sqrt{\sigma_1^2 + 3\tau_1^2} = 211.35 \text{ MPa} < 1.1f = 236.5 \text{ MPa}$ , 满足强度要求。

### 3.2 按照本文方法验算腹板局部稳定性

腹板平均剪应力  $\tau = 46.88 \text{ MPa}$ , 剪应力与最大压应力之比  $\gamma = 0.231$ , 腹板最小压应力  $\sigma_2 = -142.85 \text{ MPa}$ , 因此腹板的弯曲应力梯度  $\alpha = 1.705$ , 由式(6)可知组合梁腹板非均匀受压时的屈曲系数  $k_1 = 17.32$ , 当腹板未设横向加劲肋时, 组合梁腹板纯剪时的屈曲系数  $k_2 = 5.34$ , 取组合梁腹板非均匀受压时翼缘对腹板的嵌固系数  $\chi_1 = 1.51$ , 取组合梁腹板纯剪时翼缘对腹板的嵌固系数  $\chi_2 = 1.23$ , 将上述系数代入式(10)可求得未设横向加劲肋时腹板弹性屈曲系数  $k_e = 18.96$ , 由式(12)可知未设横向加劲肋时组合梁负弯矩区的腹板高厚比限值  $\frac{h_0}{t_w} = 96 \leq \sqrt{\frac{k_e \pi^2 E}{12(1-\nu^2) f_y}} = 122.6$ , 不必设加劲肋。

### 3.3 按照文献[4]验算腹板局部稳定性

因  $80 < \frac{h_0}{t_w} = 96 < 170$ , 故需要设横向加劲肋。

计算结果表明:

(1) 按本文方法计算连续组合梁腹板的局部稳定性, 结论是可以不必设加劲肋, 而按照文献[4]的计算结果则需要设横向加劲肋, 因此对连续组合梁不宜按照文献[4]验算腹板的局部稳定性。与文献[4]相比, 用本文方法确定腹板的高厚比限值, 有利于减少用钢量、简化施工、降低工程造价。

(2) 对连续组合梁, 若不考虑腹板的实际受力状态而按照构造要求设加劲肋, 有可能给设计和施工带来困难, 降低工程的经济性, 比较合理的方法是根

据钢梁的实际受力状态来确定腹板的临界高厚比。

(3) 对钢梁腹板局部稳定性和加劲肋布置影响最大的通常是剪应力, 其次才是弯曲应力。但连续组合梁负弯矩区钢梁腹板的弹性临界高厚比主要受弯曲应力的影响, 其次为剪应力, 与现有规范相比, 该计算方法具有更广泛的适用性。

## 4 结 语

对负弯矩区钢梁腹板在弯曲应力、轴向压应力和剪应力联合作用下的力学性能进行了研究。基于偏心受压与剪切联合作用下的相关方程和各种简单受力条件下的屈曲分析结果, 计算了钢梁腹板在复合应力状态下的弹性屈曲系数, 提出了组合梁在弹性受力阶段钢梁腹板不设横向加劲肋的高厚比限值。与现有规范相比, 该计算方法具有更广泛的适用性, 并且在大部分情况下可以放宽对高厚比限值的限制, 对工字型组合梁负弯矩区钢梁腹板的合理优化设计具有参考价值。

### 参考文献:

#### References:

- [1] 李廉锟. 结构力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1996: 35-148.  
LI Lian-kun. Structural Mechanics[M]. Beijing: Higher Education Press, 1996: 35-148.
- [2] 沈祖炎, 陈扬驥, 陈以一. 钢结构基本原理[M]. 2 版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2005: 56-63.  
SHEN Zu-yan, CHEN Yang-ji, CHEN Yi-yi. Steel Structure Design Principles [M]. 2nd ed. Beijing: China Architecture & Building Press, 2005: 56-63.
- [3] 陈世鸣. 钢-混凝土连续组合梁负弯矩区的局部失稳[J]. 建筑结构学报, 1995, 16(6): 30-37.  
CHEN Shi-ming. Local Buckling of Continuous Composite Beam at Hogging Moment Region[J]. Journal of Building Structures, 1995, 16(6): 30-37.
- [4] GB 50017—2003, 钢结构设计规范[S].  
GB 50017—2003, Steel Structure Design Specification [S].
- [5] 王国周, 瞿履谦. 钢结构原理与设计[M]. 北京: 清华大学出版社, 1993: 35-148.  
WANG Guo-zhou, QU Lu-qian. Principle and Design of Steel Structures[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1993: 35-148.
- [6] 陈绍蕃. 钢结构稳定设计指南[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1996: 215-322.  
CHEN Shao-fan. Guide to Stability Design of Steel Structures[M]. Beijing: China Architecture & Build-

- ing Press,1996;215-322.
- [7] 蒋丽忠,李 兴.等端弯矩作用下钢-混凝土组合梁侧向失稳的弹性解[J].工业建筑,2007,37(增):490-493.
- JIANG Li-zhong, LI Xing. Lateral Buckling Elastic Solution of Steel-concrete Composite Beams Acted on Its End Swith an Equal Constant Bending Moment [J]. Industrial Construction,2007,37(S):490-493.
- [8] HANCOCK G J, BRADFORD M A, TRAHAI R N S. Web Distortion and Flexural-torsional Buckling [J]. Journal of the Structural Division,1980,106(7):1557-1571.
- [9] 周宗吾,尹玉秋,康文梅.简支钢-混凝土组合梁腹板的稳定分析[J].华北科技学院学报,2002,4(3):44-45.
- ZHOU Zong-wu, YIN Yu-qiu, KANG Wen-mei. Simply Supported Steel-concrete Composite Beam Web Stability Analysis[J]. Journal of North China Institute of Science and Technology,2002,4(3):44-45.
- [10] 邹彩凤,谢 伟.工字型截面梁角裂纹的应力强度因子分析[J].西安科技大学学报,2009,29(5):622-625.
- ZOU Cai-feng, XIE Wei. Analysis of Stress Intensity Factors for Corner Crack in Section I-beam [J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology,2009,29(5):622-625.
- [11] 王春生,宋天谥,冯亚成,等.高强钢-混凝土组合梁受力性能分析[J].交通运输工程学报,2008,8(2):27-33.
- WANG Chun-sheng, SONG Tian-yi, FENG Ya-cheng, et al. Structural Behavior Analysis of High Strength Steel-concrete Composite Girders [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering,2008,8(2):27-33.
- [12] 李公平.预应力混凝土连续钢构桥的施工监控[J].筑路机械与施工机械化,2005,25(9):46-48.
- LI Gong-ping. Monitoring of Prestressing Force Concrete Bridge Construction [J]. Road Machinery & Construction Mechanization,2005,25(9):46-48.
- [13] 尧云涛,肖汝诚.考虑空间效应的钢-混凝土组合梁单元研究[J].中国公路学报,2008,21(3):53-56.
- YAO Yun-tao, XIAO Ru-cheng. Research on Segment Element of Steel-concrete Composite Slab Beam Considering Spatial Effect [J]. China Journal of Highway and Transport,2008,21(3):53-56.
- [14] 杨 勇,周丕健,聂建国,等.钢板-混凝土组合桥面板静力与疲劳性能试验[J].中国公路学报,2009,22(4):78-83.
- YANG Yong, ZHOU Pi-jian, NIE Jian-guo, et al. Experiment on Static and Fatigue Behavior of Steel Plate-concrete Composite Bridge Decks [J]. China Journal of Highway and Transport,2009,22(4):78-83.
- [15] 王建超,赵君黎,贡金鑫,等.钢-混凝土组合桥梁承载力可靠度分析[J].中国公路学报,2009,22(3):76-82.
- WANG Jian-chao, ZHAO Jun-li, GONG Jin-xin, et al. Bearing Capacity Reliability Analysis of Steel-concrete Composite Bridge [J]. China Journal of Highway and Transport,2009,22(3):76-82.
- [16] 王艳丽,王春生,翟晓亮,等.带管翼缘的钢-混凝土组合梁抗弯性能试验研究[J].交通运输工程学报,2008,8(6):63-69.
- WANG Yan-li, WANG Chun-sheng, ZHAI Xiao-liang, et al. Experimental Research of Bending Capacity for Steel and Concrete Composite Girder with Concrete Filled Tubular Up-flange [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering,2008,8(6):63-69.

## 《建筑科学与工程学报》入选“中国精品科技期刊”

国家科技部委托中国科学技术信息研究所每年出版《中国科技期刊引证报告》,定期公布中国科技论文与引文数据库(CSTPCD)收录的中国科技论文统计源期刊的总被引频次、影响因子、即年指标、基金论文比、他引率等十几个科学计量指标。从1999年开始,以这些指标为基础,研制了中国科技学术期刊综合评价指标体系,该评价体系是业界公认的客观、全面和科学的期刊评价体系。采用层次分析法,由专家打分确定了重要指标的权重,并分学科对每种期刊进行综合评定,该评定结果客观公正,代表了中国科技期刊的最高学术水平。2008年共评选出300种“中国精品科技期刊”,《建筑科学与工程学报》入选“中国精品科技期刊”。