

第一节 公路桥梁线路整体评定

1、公路桥梁线路使用价值评定

普通公路的规划使用期限一般为 20 年而高速公路的一般为 30 年。公路桥梁在规划使用期限内的使用价值一般按式 (4-1)

进行评估:

$$k = \frac{R_1 - E_1 - E_2}{R_2 - E_3 - E_4} \quad (4-1)$$

其中: R_1 —— 规划期限内利用桥梁路线的总收益;

R_2 —— 改建新桥路线在规划期内的总收益;

E_1 —— 规划期限内桥梁加固改造总支出;

E_2 —— 规划期限内桥梁路线养护总支出;

E_3 —— 新建桥梁的总支出;

E_4 —— 改建新桥路线养护的总支出。

当桥梁使用价值系数 $K > 1$ 时,桥梁具有宏观使用价值,有必要进行加固改

2、公路桥梁线路承载能力评定

对线路上定期检查中确定为四类的桥梁,均应进行承载能力的评定(详见第四节)

其承载能力评定,可分线路依据表 4-1 规定,以承载能力适应率为指标进行考核。

各级公路对应车辆荷载

表 4-1

公路等级	汽车专用公路			一般公路		
	高速公路	一级公路	二级公路	二级公路	三级公路	四级公路
计算荷载	汽-超 20	汽-超 20、20	汽-20	汽-20	汽-20	汽-10
验算荷载	挂-120	挂-120、100	挂-100	挂-100	挂-100	履带-50

$$\beta_c = \frac{N_c}{N} \times 100\% \quad (4-2)$$

式中： β_c ——桥梁线路承载能力适应率；

N_c ——考查线路上符合表 4-1 要求的桥梁座数；

N ——考查线路上总的桥梁座数。

当 $90 \leq \beta_c \leq 100$ 时，线路承载能力评定等级为“良好”；

当 $70 \leq \beta_c < 90$ 时，线路承载能力评定等级为“适应”；

当 $\beta_c < 70$ 时，线路承载能力评定等级为“不适应”。

3、公路桥梁线路通行能力评定

桥梁线路通行能力适应率 β_t 计算公式如下：

$$\beta_t = \frac{N_t}{N} \times 100\% \quad (4-3)$$

式中： β_t ——桥梁线路通行能力适应率；

N_t ——考查线路上计算通行能力满足交通量要求的桥梁座数；

N ——考查线路上总的桥梁座数。

当 $90 \leq \beta_t \leq 100$ 时，线路通行能力评定等级为“良好”；

当 $70 \leq \beta_t < 90$ 时，线路通行能力评定等级为“适应”；

当 $\beta_t < 70$ 时，线路通行能力评定等级为“不适应”。

4、公路桥梁线路泄洪能力评定

桥梁线路通行能力适应率 β_c 计算公式如下

第二节 公路桥梁外观调查评定

公路桥梁外观调查评定，由有经验的桥梁检查工程师负责，依据桥梁调查资料（以定期检查结果为主），从缺损状况、技术状况、养护对策等方面，对桥梁质量作出综合评定。

1、桥梁部件缺损状况评定（累加评分）

根据缺损程度（大小、多少、轻重）、缺损对结构使用功能的影响程度（无、小、大）和缺损发展变化状况（趋向稳定、发展缓慢、发展较快）等三个方面，以累加评分方法对各部件缺损状况作出等级评定，详见表 4-2。

对重要部件（墩台、基础、上部承重构件、支座等），以其中缺损最严重的构件评分；其它部件，根据多数构件缺损状况评分。

2、桥梁部件权重及综合评定

采用考虑桥梁各部件权重的综合评定方法，或以重要部件最差的缺损状况评定，对全桥技术状况等级作出评定。推荐的桥梁各部件权重及算式见表 4-3。

3、全桥技术状况综合评定

全桥技术状况评定等级，可分为一类、二类、三类、四类和五类，详见表 4-4。根据桥梁技术状况分类，确定相应的养护措施是：一类桥梁进行正常保养；二类桥梁需进行小修；三类桥梁需进行中修，酌情进行交通管制；四类桥梁需进行大修或改造，及时进行交通管制，如限载、限速通过，当缺损较严重时应关闭交通；五类桥梁需要进行改建或重建，及时关闭交通。

桥梁部件缺损状况评定方法

表 4-2

缺损状况及标度		程 度	组合评定标度						
缺损程度及标度			小 → 大 少 → 多 轻度 → 严重						
		标度	0	1	2	3	4		
缺损对结构使用 功能的影响程度	无、不重要	0			0	1	2		
	小、次要	1			1	2	3		
	大、重要	2			2	3	4		
以上两项评定组合标度			0	1	2	3	4		
缺损发展变化 状况的修正	趋向稳定	-1			0	1	2	3	
	发展缓慢	0			0	1	2	3	4
	发展较快	+1			1	2	3	4	5
最终评定结果			0	1	2	3	4	5	
桥梁技术状况及分类			完 好 一 类	良 好 二 类	较 好 三 类	较 差 四 类	坏 的 五 类	危 险	
注：“0”表示完好状态，或表示没有设置的构造部件，如调治构造物									
“5”表示危险状态，或表示原无设置，而调查表明需要补设的结构部件									

推荐的桥梁各部位权重及综合评定方法

表 4-3

部件	部件名称	权重 W_i	桥梁技术状况评定办法
1	翼墙、耳墙	1	(1) 综合评定采用下列计算式： \square □—依据桥梁部件缺损状况评定方法 所得各部件的评定标度（0~5）
2	锥坡、护坡	1	
3	桥台及基础	23	
4	桥墩及基础	24	
5	地基冲刷	8	
6	支 座	3	

7	上部主要承重构件	20	<p>□—各部件权重，</p> <p>D□—全桥结构技术状况评分（0~100）； 评分高表示结构状况好，缺损少。</p> <p>评定分类采用下列界限</p> <p>□ ≥ 88 一类</p> <p>88 > □ ≥ 60 二类</p> <p>60 > □ ≥ 40 三类</p> <p>40 > □ 四类、五类</p> <p>注：□ ≥ 60 的桥梁，并不排除其中有评定 标度 □ ≥ 3 的部件，仍有维修的需求。</p>
8	上部一般承重构件	5	
9	桥面铺装	1	
10	桥头与路堤连接部	3	
11	伸缩缝		
12	人行道	1	
13	栏杆、护栏	1	
14	灯具、标志	1	
15	排水设施	1	
16	调治构造物	3	
17	其它	1	

桥梁技术状况评定标准

表 4-4

	一类	二类	三类	四类	五类
	完好良好状态	较好状态	较差状态	差的状态	危险状态
总体评定	①重要部件材料均良好 ②次要部件功能良好，材料有少量（3%以内）轻度缺损或污染。 ③承载能力与桥面行车条件符合设计指标 ④只需日常清洁保养。	①重要部件功能良好，材料有局部（3%以内）轻度缺损或污染，裂缝小于限值 ②次要部件有较多（10%以内）中等缺损或污染 ③承载能力和桥面行车条件达到设计指标。 ④需要小修保养	①重要部件材料有较多（10%以内）中等缺损，裂缝缝宽超限，或出现轻度功能性病害，但发展缓慢，尚能维持正常使用能。 ②次要部件有大量的（10%~20%）严重缺损，功能降低，继续恶化将不利于重要部件和影响正常交通 ③承载能力比设计降低10%以内，桥面行车不舒适。 ④需要进行中修。	①重要部件材料有大量（10%~20%）严重缺损，裂缝宽度超限，裂缝间距小于计算值，风化、剥落、露筋、锈蚀严重；或出现中等功能性病害，且发展较快。结构变形小于或等于规范值功能明显降低 ②次要部件有20%以上严重缺损，失去应有功能，严重影响正常交通 ③承载能力比设计降低10%~25%，必要时限速或限载通行 ④要通过特殊检查，确定大修、加固或更换构件的措施。	①重要部件出现严重的功能性病害，且有继续扩展现象；关键部位的部分材料强度达到极限，出现部分钢筋断裂、混凝土压碎或压杆失稳变形的破损现象，变形大于规范值，结构的强度、刚度、稳定性和动力响应不能达到平时交通安全通行要求 ②承载能力比设计降低25%以上，必须降低通行荷载与车速，或封闭交通。 ③要通过特殊检查，确定处治对策。

墩台与基础	①墩台各部分完好。 ②基础及地基状况良好。	①墩台基本完好。②3%以内的表面有风化麻面、短细裂缝，缝宽小于限值，砌体灰缝脱落。 ③表面长有苔藓、杂草。 ④基础无冲蚀	①墩台3%~10%的表面有各种缺损，裂缝宽度超限值，有风化、剥落、露筋、锈蚀现象；砌体灰缝脱落，局部变形等。 ②出现轻微的下沉、倾斜滑动等现象，发展缓慢或趋向稳定。 ③基础有局部冲蚀现象，桩基顶段被磨损	①墩台10%~20%的表面有各种缺损，裂缝宽而密，剥落、露筋、锈蚀严重，砌体大面积的松动、变形。 ②墩台出现下沉、倾斜、滑动、冻起现象，台背填土有沉降裂缝或挤压隆起变形发展较快，变形小于或等于规范值。 ③基础冲刷大于设计值基底冲空面在10~20%内。桩基顶段被侵蚀、露筋、颈缩，或有环状冻裂，木桩腐蚀严重	①墩台不稳定，下沉、倾斜、滑动。冻起现象严重，变形大于规范值，造成上部结构和桥面变形过大，不能正常行车。 ②墩台、桩基出现结构性断裂，裂缝有开合现象。 ③基底冲刷面达20%以上，冲刷深度大于设计值，地基失效，承载力降低，桥台岸坡滑移。
	①各部分清洁，完好无缺，位置正确。 ②活动支座伸缩与转动正常。	①支座有尘土堆积略有腐蚀 ②支座滑动面干涩。	①钢支座固定螺栓松动，锈蚀严重。 ②橡胶支座开始老化 ③混凝土支座有剥落、露筋、锈蚀现象。	①钢支座组件出现断裂 ②橡胶支座老化开裂。 ③混凝土支座碎裂。 ④活动支座坏死。 ⑤支座上下错位过大，有倾倒脱落的危险。	支座错位、变形。破损严重，已失去正常支承功能，使上下部结构受到异常约束，造成支承部位的缺损和桥面的不平顺。
	一类	二类	三类	四类	五类
	完好良好状态	较好状态	较差状态	差的状态	危险状态
砖石混凝土上部结构	①结构完好，无渗水，无污染 ②次要部位有少量短细裂纹，裂纹宽度小于限值。	①结构基本完好 ②3%以内的表面有风化、麻面短细裂缝，缝宽小于限值，砌体灰缝脱落。 ③上、下游侧表面有水迹污染，砌体滋生草木。	①结构3%~10%的表面有各种缺损，裂缝缝定超限值，有风化、剥落、露筋、锈蚀，桥面板裂缝渗水。 ②石砌拱桥砌体砌体灰缝脱落，局部松动、外鼓。 ③横向联接件断裂、脱焊或松动，边梁或边拱肋有横移或外倾迹象。	①结构10%~20%的表面有各种缺损，重点部位出现接近全截面的开裂，裂缝缝宽超限值，间距小于计算值，顺主筋方向有纵向裂缝，钢筋锈蚀和混凝土剥落严重，桥面开裂渗水严重，砌体有较大松动、变形。 ②结构存在永久变形，变形小于或等于规范值，桥面竖向成波形 ③支座脱落，桥面呈锯齿状	①结构永久变形大于规范值 ②重点部位出现全截面开裂，部分钢筋屈服或断裂，混凝土压碎。主拱圈出现四铰不稳定结构 ③受压构件有严重的横向扭曲变形 ④结构的振动或摆动过大，行车和行人有不安全感 ⑤承载能力比设计降低25%以上。

钢结构	<p>①各部件及焊缝均完好。</p> <p>②各节点铆钉、螺栓无松动</p> <p>③各部分油漆均匀平光、完整，色泽鲜明。</p>	<p>①各部件完好，焊缝无开焊。</p> <p>②少数节点有个别铆钉、螺栓松动变形。</p> <p>③油漆变色、起泡剥落，面积在10%以内。</p>	<p>① 个别次要构件有局部变形，焊缝有裂纹。</p> <p>②联结铆钉、螺栓损坏在10%以内。</p> <p>③油漆失效面积在10%~20%之间。</p>	<p>①个别主要构件有扭曲变形、损伤裂纹。开焊、严重锈蚀。</p> <p>②联结铆钉、螺栓损坏在10%~20%之间。</p> <p>③油漆失效面积在20%以上。</p>	<p>①主要构件有严重扭曲变形、开焊，锈蚀削弱截面10%以上，钢材变质，强度性能恶化。油漆失效面积在50%以上</p> <p>②节点板及联结铆钉、螺栓损坏在20%以上。</p> <p>③结构永久变形大于规范值</p> <p>④结构振动或摆动过大，行车和行人有不安全感。</p>
木桥	<p>①各部构件完好无缺。</p> <p>②防腐、防蚁效果良好。</p>	<p>①基本完好，少数联接点松动，小件脱落。</p> <p>②结构有泥土、杂草堆积</p>	<p>①主要构件结合部位和木桩干湿交替部位等出现腐朽松动、局部脱落。</p> <p>②墩台开始变形、结构出现轻度不稳固现象。</p>	<p>①10%~20%的主要构件和20%以上的次要构件有腐朽、松动、脱落。</p> <p>②墩台、结构变形小于或等于规范值，结构有明显的稳固现象。</p>	<p>①结构全面严重腐朽、脱落。</p> <p>②墩台不稳定，下沉、倾斜、冻拔严重，变形大于规范值。</p> <p>③桥面起伏和摆动过大，结构极不稳定。</p>
人行道栏杆	完整清洁，无松动，少数构件局部有细裂纹、麻面。	个别构件破损、脱落，3%以内构件有松动、裂缝、剥落和污染。	10%以内构件有松动、开裂、剥落、露筋、锈蚀、破损、脱落。	10%~20%构件严重损坏、错位、变形、脱落、残缺。	20%以上构件残缺
	一类	二类	三类	四类	五类
	完好良好状态	较好状态	较差状态	坏的状态	危险状态
桥面铺装伸缩缝	<p>①铺装层完好平整、清洁，或有个别细裂缝。</p> <p>②防水层完好、泄水管完好畅通。</p> <p>③伸缩缝完好、清洁。</p> <p>④桥头平顺，无跳车现象。</p>	<p>①铺装层10%以内的表面有纵横裂缝，间距大于1.5m，浅坑槽、波浪</p> <p>②防水层基本完好，泄水管堵塞，周围渗水。</p> <p>③伸缩缝局部螺帽松动，钢桥开焊，铺装碎边缝内堵塞卡死。</p> <p>④桥头轻度跳车，台背路面下沉在2cm以内。</p>	<p>①铺装层10%~20%的表面有严重的龟裂、深坑槽、波浪</p> <p>②桥面板接缝处防水层断裂渗水，泄水管破损、脱落。</p> <p>③伸缩缝普遍缺损，铺装碎边严重，出现跳车现象。</p> <p>④桥头跳车明显，台背路面下沉2~5cm。</p>	<p>①铺装层20%以上表面有严重的破碎、坑槽，桥面普遍坑洼不平、积水。</p> <p>②防水层老化失效，普遍断裂、渗水、泄水管脱落，孔堵塞。</p> <p>③伸缩缝严重破损、失效，难以修补。</p> <p>④桥头跳车严重，台背路面下沉大于5cm。</p>	

翼墙耳墙；锥坡护坡	①翼墙完好无损、清洁。 ②锥坡完好，无垃圾堆积，无草木滋生。 ③桥头排水沟和行人台阶完好。	①翼墙出现个别裂缝，缝宽小于限值，局部剥落，砌体灰缝脱落面积在 10% 以内。 ②锥坡局部塌陷，铺砌缺损，垃圾堆积，草木丛生。 ③桥头排水沟堵塞不畅通，行人台阶局部塌落。	①翼墙断裂与桥台前墙脱开，但无明显外倾、下沉、砌体灰缝脱落、局部松动外鼓，面积小于 20%。 ②锥坡出现大面积塌陷，铺砌缺损，形成冲沟或积水坑，坡脚有局部冲蚀。 ③桥头排水沟和行人台阶损坏，功能降低。	①翼墙断裂、下沉、外倾失稳，砌体变形，严重部分倒塌。 ②锥坡体和坡脚冲蚀严重，有滑坡。坍塌，坡顶下降较大，护坡作用明显减小。 ③桥头排水沟和行人台阶全部损坏，几乎消失。	
调治构造物	①构造设置合理，功能正常。 ②构造物完好，无存留漂浮物。	①构造物功能基本正常。 ②构造物局部断裂，砌体松动、变形。	①构造本身抗洪能力不足，基础局部冲蚀。 ②构造物 20% 以内出现下沉、倾斜、局部坍塌。	①构造本身抗洪能力太低，基础冲蚀严重。 ②构造物 20% 以上被破坏，部分丧失功能或功能下降。	①构造物大范围毁坏，失去功能，或设置不合理，未达到预期效果。 ②原未设置而调查表明需要补充设置者。
照明标志	完好无缺，布置合理。	照明灯泡坏，灯柱锈蚀，标志不正、脱落。	灯柱歪斜不正，灯具损坏，标志倾斜损坏。	照明线路老化断路或短路，灯柱、灯具残缺不齐，标志损失严重。	

$$\beta_x = \frac{N_x}{N} \times 100\% \quad (4-4)$$

式中： β_x —— 桥梁线路泄洪能力适应率；

N_x —— 考查线路上计算泄洪能力可满足要求的桥梁座数；

N —— 考查线路上总的桥梁座数。

当 $90 \leq \beta_x \leq 100$ 时，线路泄洪能力评定等级为“良好”；

当 $70 \leq \beta_x < 90$ 时，线路泄洪能力评定等级为“适应”；

当 $\beta_x < 70$ 时，线路泄洪能力评定等级为“不适应”。

第三节 公路桥梁分析计算评定

分析计算评定法建立在桥梁外观调查的基础之上，依据调查到的资料，利用桥梁结构理论加以分析、计算。评价采用桥梁设计规范中的各等级荷载或被控制车辆的荷载。评价时采用极限状态计算分析，各系数宜根据详细检测的结构状况分别选定，使计算分析结果能真实地评价结构承载能力。评定具体方法如下：

1、桥梁检查后确定出桥梁检算承载能力的折减或提高系数（即确定桥梁检算系数 Z_1 ）

2、接现行的桥梁设计规范，根据检查所得桥梁基础位移、结构变形、构件开裂、破损等情况，对结构抗力效应考虑引入不大于 1.2 的结构检算系数进行结构强度和稳定性检算，检算公式如下：

$$(r_0 S) \leq R \cdot Z_1 \quad (4-5)$$

$$R = R(f_d, a_d) Z_1 \quad (4-6)$$

式中 r_0 —桥梁结构的重要性系数；

S —作用效应的组合设计值；

R —构件承载力设计值；

$R(\cdot)$ —构件承载力函数；

f_d —材料强度设计值；

a_d —几何参数设计值。

如果是按原规范（JTJ 023-85），则应采用如下公式：

1) 砖、石、混凝土结构的承载力检算公式为

$$S_d(\gamma_{so}\psi\xi_q \sum \gamma_{si}Q) \leq R_d\left(\frac{R_j}{\gamma_m}, \alpha_k\right) Z_1 \quad (4-7)$$

2) 钢筋混凝土及预应力混凝土结构的承载力检算公式为

$$S_d(\gamma_G G; \gamma_q \xi_q \sum Q) \leq \gamma_b R_d\left(\frac{R_c}{\gamma_c}, \frac{R_s}{\gamma_s}\right) Z_1 \quad (4-8)$$

由于现行规范与原规范有较大差异，计算时应该注意。 Z_1 根据不同桥型及桥梁实际情况而定。梁桥、拱桥两种主要桥型的 Z_1 取值参见表 4-5

梁桥、拱桥的 Z_1 值表

表 4-5

□值	桥 梁 状 况	
	梁 桥	拱 桥
1.1~1.2		地基良好；墩、台基础未发生位移；

1.0~1.1	桥梁各构件混凝土质量好；裂缝宽	墩、台基础未发生明显位移；拱轴线
0.9~1.0	桥梁各构件混凝土质量较差；少数裂	墩、台基础未位移较小；拱轴线偏离
0.9 以下	桥梁各构件混凝土及钢筋出现严重	墩、台产生了较大的位移或转角，转

3、依据检算的主要指标超限情况, 确定是否需要进一步进行荷载试验, 对于需要作荷载试验的桥梁, 需根据荷载试验的结果重新确定桥梁检算系数 Z_2 (详见第四节), 再进行结构强度和稳定性的校核。

4、在桥梁检查基础上, 按上一节方法, 认真进行桥梁缺损状况评分, 确定桥梁承重构件的技术状态, 更加规范的确定桥梁检算系数 Z_1 (表 4-6)

更加规范的确定 Z_1 值表

表 4-6

缺损状况评分	技术状态	桥梁检算系数
0~1	完 好	1.1~1.2
1~2	较 好	1.0~1.1
2~3	正 常	0.9~1.0
3~4	可恢复	0.75~0.9
4~5	危 险	0.75 以下

依据桥梁结构主要承重构件控制部位强度的实测结果、结构固有模态参数测定结果, 以及其与设计计算值的比较, 按表 4-7 确定桥梁检验系数的修正值 Z_1' 、 Z_2'' ;

混凝土构件强度变异修正值 Z_1' 与模态修正值 Z_2''

表 4-7

混凝土构件强度变异修正值 $Z_1' = (\alpha \Delta R_a) / R_a$		模态修正值 Z_2''	
T 形截面 α	矩形截面 α	特征频率变化幅度	Z_2''
0.9	0.7	30%	0.16
0.8	0.6	20%	0.11
0.9	0.7	15%	0.08
0.7	0.45	10%	0.05

最终确定桥梁检算系数 $Z_{10} = Z_1 + Z_1' + Z_1''$ ，并对桥梁结构的强度及稳定性检算校核：

1) 砖、石、混凝土结构的承载能力检算公式：

$$S_d (\gamma_{so} \psi \xi_q \sum \gamma_{sl} Q) \leq R_d \left(\frac{R_j}{\gamma_m}, \alpha_k \right) Z_{10} \varphi (1 - \xi_t) \quad (4-9)$$

2) 钢筋混凝土及预应力混凝土结构的承载能力检算公式：

$$S_d (\gamma_G G; \gamma_q \xi_q \sum Q) \leq \gamma_b R_d \left(\frac{R_c}{\gamma_c}, \frac{R_s}{\gamma_s} \right) Z_{10} \varphi (1 - \xi_t) \quad (4-10)$$

ξ_q 、 φ 、 ξ_t 分别为活载影响系数、耐久性恶化系数、截面损伤折减系数（详见后述）。

若检算校核结果为结构荷载效应小于抗力效应，则可得出结论：桥梁承载能力满足检算荷载要求。若检算校核结果为结构的荷载效应大于抗力效应，但超出幅度在 30% 以下时，则需对桥梁作进一步荷载试验评定其承载能力。

5、因我国存在超限超重运输问题，桥梁疲劳损伤问题突出，对经常通过超重车辆或大吨位车辆的桥梁，在承载能力检算时，应引入一个活载影响系数。超载情况一般可通过活载重量频遇值来反应，荷载频遇值指桥梁上出现的荷载较大的车辆，通常表示荷载跨越某一水平的频繁程度。由车辆荷载重量分布函数 0.95 分位值可得到车辆荷载的频遇值。通过比较标准荷载分布 Q_1 和实际活载分布的频遇值 Q_2 ，可得活载影响系数 ξ_q ：

$$\xi_q = \frac{Q_1}{Q_2} \quad (3-4-5)$$

根据 ξ_q 适当调整荷载效应组合及活载效应的分项系数，以反映桥梁活载实际情况。

钢筋锈蚀是影响钢筋混凝土构件耐久性和使用寿命的重要因素，钢筋锈蚀可以造成桥梁承载能力严重下降，可见耐久性损伤对桥梁承载能力的影响主要取决于钢筋的腐蚀程度。因此，可以通过分析钢筋的锈蚀程度来评价桥梁结构耐久性的恶化情况。而对桥梁钢筋锈蚀状况的整体评价，可通过对其影响因素（氯离子含量、锈蚀电位、混凝土电阻率、混凝土碳化深度等）的检测来进行。钢筋锈蚀是一个随时间不断发展的化学过程，必须根据上述四个方面的检测结果，确定钢筋的初始锈蚀时间，综合评价钢筋锈蚀对桥梁结构承载力的影响。确定钢筋的初始锈蚀时间 T_0 可从两点入手：(1)混凝土保护层碳化到一定程度的时间；(2)当氯离子和氧分子含量达到某定值所需的时间。

通过试验确定锈蚀速度 V 与混凝土电阻率、锈蚀电位、氯离子含量、碳化深度间的关系：

$$V = \lambda \eta F(U, R) \quad (4-8)$$

锈蚀不均匀系数 η 取值

表 4-11

氯离子含量 (%)	0.4	0.6	0.8	1.0	1.4
锈蚀不均匀系数 η	1.0	1.2	1.4	1.8	2.5

$F(U, R)$ 的取值

表 4-12

	$R < 5000$	$5000 \leq R < 10000$	$10000 \leq R < 20000$	$20000 \leq R$
$-200 < U$	0.05	0.04	0.03	0.02
$-350 < U < -200$	0.10	0.08	0.06	0.05
$-500 < U < -350$	0.30	0.20	0.15	0.10
$U < -500$	0.50	0.40	0.35	0.30

式中 η —锈蚀不均匀系数，见表 4-11；

$F(U, R)$ —锈蚀电位及混凝土电阻率与钢筋锈蚀速度之间的关系，见表 4-12

U ——锈蚀电位（单位 mv ）；

R ——混凝土电阻率（单位 $\Omega \cdot \text{cm}$ ）。

因此， T 时刻钢筋锈蚀程度的表达式为

$$\phi(T) = \frac{[D_0 - 2V(T - T_0)]^2}{D_0^2} \quad (4-9)$$

式中 D_0 为钢筋锈蚀前的直径（ mm ）。

耐久性恶化系数 ϕ 可以通过钢筋锈蚀程度函数来表达，见表 4-13

耐久性恶化系数 ϕ

表 4-13

锈蚀程度 (%)	5	10	15	20	25
耐久性恶化系数 ϕ	0.05	0.08	0.12	0.15	0.20

折减系数 ξ_t 可反映桥梁构件截面在使用过程中被削弱的程度。截面被削弱

原因主要有：混凝土碳化、机械磨损、裂缝等。相应的截面损伤折减系数 ξ_t 可表示为：

$$\xi_t = \xi_{r1} + \xi_{r2} \quad (4-10)$$

式中 ξ_{r1} —— 混凝土碳化引起的截面削弱折减系数；

ξ_{r2} —— 表面机械损伤折减系数。

根据检测所得混凝土碳化深度及混凝土截面特征计算出截面损失率。为此混凝土截面分为：矩形截面、T形截面、圆形截面。对于矩形截面、T形截面（形截面根据规范规定可折合成T形截面）应分为全预应力和部分预应力两种情况。圆形截面一般应用在下部结构。故混凝土构件碳化引起的截面削弱折减系数可示为：

$$\text{全预应力构件 矩形截面: } \xi_{r1} = \frac{X}{B} \frac{(R_0 - R_H)}{R_0} \left(2 + \frac{B}{H}\right) \quad (4-11)$$

$$\text{T形截面: } \xi_{r1} = \frac{X}{\sum B} \frac{(R_0 - R_H)}{R_0} \left(2 + \frac{\sum B}{H}\right) \quad (4-12)$$

$$\text{圆形截面: } \xi_{r1} = \frac{X^2}{R^2} \frac{(R_0 - R_H)}{R_0} \quad (4-13)$$

$$\text{部分预应力构件 矩形截面: } \xi_{r1} = \frac{X}{B} \frac{(R_0 - R_H)}{R_0} \times 2 \frac{X_Y}{H} \quad (4-14)$$

$$\text{T形截面: } \xi_{r1} = \frac{X}{\sum B} \frac{(R_0 - R_H)}{R_0} \times 2 \frac{X_Y}{H_0} \quad (4-15)$$

对于受负弯距的截面受压区在构件截面下部，此时

$$\text{矩形截面: } \xi_{r1} = \frac{X}{B} \frac{(R_0 - R_H)}{R_0} \left(2 + \frac{B}{H}\right) \times 2 \frac{X_Y}{H_0} \quad (4-16)$$

$$\text{T形截面: } \xi_{r1} = \frac{X}{\sum B} \frac{(R_0 - R_H)}{R_0} \left(2 + \frac{\sum B}{H}\right) \frac{X_Y}{H_0} \quad (4-17)$$

式中 X —— 碳化深度；

X_Y —— 受压区高度；

H —— 截面高度；

H_0 —— 截面有效高度；

- B —— 腹板厚度；
- R_0 —— 混凝土的设计强度；
- R_H —— 混凝土碳化后的强度。

结构机械损伤是由非结构受力所造成的损伤，主要是由于施工不当或一些突发性事件所造成的，主要表现在外观上的缺损。表面机械损伤折减就是考虑外观上缺损所造成的截面损失。经过对不同面积和深度的表面机械损伤所造成的截面折减的统计、分析、总结，结论见表 4-14。

混凝土表面损伤截面折

减系数 ξ_m

表 4-14

损伤面积 (m ²)	损伤深度 (cm)		
	1	2	3
0.3	0.02	0.03	0.04
0.3~0.6	0.04	0.06	0.08
0.6~1.0	0.08	0.10	0.12
1.0~1.5	0.12	0.14	0.16

第四节 公路桥梁荷载试验评定

荷载试验后，应根据试验资料分析桥梁结构的工作状况，从而进一步评定桥梁承载能力。

1、桥梁结构的工作状况

动载试验的效率 η_d 也是一个重要指标， η_d 可表是为：

$$\eta_d = \frac{s_d}{s} \quad 4-19$$

式中 s_d 一动荷载作用下的变形或应力值；

s 一设计标准荷载作用下的变形或应力计算值。

当动载试验的效率 η_d 接近 1 时，不同车速下实测的冲击系数最大值可用于结构的强度及稳定性检算。

实测的冲击系数应满足下列条件：

$$\mu_t \cdot \eta_d \leq \mu_c \quad (4-20)$$

式中： μ_c ——设计时采用的冲击数；

μ_t ——实测的冲击数；

当式 (4-20) 不被满足时，应按实测的 μ_t 值来考虑设计标准中汽车荷载的冲击作用。

从前面的分析可以看出， μ_t 是反映结构在行车荷载作用下的动力响应，虽然 μ_t 与桥面平整度有关，与行车速度有关。对评定而言， μ_t 只能描述桥梁平整度，不能对全结构进行描述。 μ_t 的意义在于，有了实测的冲击数据之后，在进行理论分析计算时，应以实测 μ_t 为依据。而不宜采用规范的 μ_c 值。

一般而言，40~120kN 载重汽车行车激振试验测得的垂直振幅标准值 A_{vt} (指局部离差平方的二次方根) 宜小于表 4-16 所列的评定指标。

振幅标准值评定指标 表 4-16

桥型及跨度	容许振幅标准值
跨度为 20m 以下的钢筋混凝土梁桥	0.3
跨度为 20~45m 的预应力混凝土梁桥	1.0
跨度为 60~70m 的连续梁桥和 T 型刚构桥	3.0~5.0
跨度为 30~124m 的钢梁桥和组合梁桥	2.0~3.0

□

一阶自振频率 f_t 中小跨径桥梁的一阶自振频率测定一般应大于 4.0Hz ，否则为桥梁的总体刚度较差。桥梁的自振频率 f_t 可按下列各式计算：

$$1) \text{ 简支梁桥 } E_d I = 0.41(f_t)^2 \bar{m} l^2 \quad (4-21)$$

$$2) \text{ 悬臂梁桥 } E_d I = 3.20(f_t)^2 \bar{m} l^2 \quad (4-22)$$

3) 等跨连续梁桥 同简支梁桥

式中 m —— 结构每延米质量

l —— 支端点距离或跨径

I —— 结构构件的截面惯矩

E_d —— 动弹性模量。

有关简支梁桥的试验表明, f_t 实测值为 1.23~10.4Hz, 平均 3.62Hz, 一阶固有频率与跨径有关, 即

$$f_t = 95.4L^{-0.933} \quad (4-2)$$

故对简支梁桥而言, 宜按式 (4-23) 来评定。

对于其它形式的桥梁, 由于实验数据不足, 宜按下式进行评定。

$$\eta_f = \frac{f_t}{f} \leq 1 \quad (4-2)$$

式中, η_f 为频率校验系数, f_t 为实测一阶频率, f 为计算频率。很显然, 当 $\eta_f > 1$

时, 说明桥梁有缺损或病害, 达不到原设计所具备的动刚度。计算 f 时, 应遵守

静载试验计算时的原则, 特别应注意:

1) 上部结构均应同时纳入计算范围之内;

2) 充分考虑支座, 特别是橡胶支座的影响。

根据实测计算的阻尼比率 ξ_t 按表 4-17 可以判断桥梁的开裂状况。

ξ_t 值与裂缝相关性表

表 4-17

材料	裂缝	ξ_t 的相应值
素混凝土及钢筋混凝土	无裂缝	$\xi_t < 0.5$
	有裂缝	$\xi_t > 1.0 \sim 2.0$
预应力混凝土	无裂缝	$\xi_t < 1.0$
	有裂缝	$\xi_t 1.0 \sim 2.0$

桥梁阻尼是一个重要的、又十分复杂的参数，它由构成桥梁的材料阻尼，构阻力和系统阻尼所构成，阻尼比只能通过试验获得。

以表 3-4-4 ξ_t 值来判断结构是否开裂的条件过宽。有关梁式桥试验表明，出率频率最高的桥梁 ξ_t 集中在 $\xi_t=0.78\%$ 。最长 $\geq 125\text{m}$ 直线、窄的和闭口横截面的桥中， $\xi_t=0.786\%$ ；总长 $< 75\text{m}$ 曲线、宽的和开口截面短桥中， $\xi_t=16\%$ 。

2、桥梁结构的强度及稳定性

当荷载试验项目比较全面时，可采用荷载试验主要挠度测点的校验系数 η 评定桥梁结构的强度和稳定性。检算时用荷载试验后的桥梁检算系数 Z_2 代替前的桥梁检算系数 Z_1 ，对桥梁结构抗力效应予以提高或折减。

1) 砖、石、混凝土桥梁：

$$S_d(\gamma_{so}\psi\sum\gamma_{si}Q) \leq R_d\left(\frac{R_j}{\gamma_m}, \alpha_x\right) \times Z_2 \quad (4-25)$$

2) 钢筋混凝土及预应力混凝土桥梁：

$$S_d(\gamma_G G; \gamma_q \sum Q) \leq \gamma_b R_d\left(\frac{R_c}{\gamma_c}, \frac{R_s}{\gamma_s}\right) \times Z_2 \quad (4-26)$$

根据 η 值由表 4-18 查取 Z_2 的取值范围，再根据下列条件确定 Z_2 值。符合下列条件时， Z_2 值可取高限，否则应酌减，直至取低限。

1) 加载内力与总内力（加载内力+恒载内力）的比值较大，荷载试验效果好。

2) 实测值与理论值线性关系较好，相对残余变位（或应变）较小。

3) 桥梁结构各部分无损伤，风化、锈蚀、裂缝等较轻微。

η 值应取控制截面内力最不利程序时最大挠度测值进行计算。对梁桥可采用跨中最大正弯矩加载程序的跨中挠度；对拱桥检算拱顶截面时可采用拱顶最大弯矩加载程序时跨中挠度；检算拱脚截面时可采用拱脚最大负弯矩加载程序时 $L/4$ 截面处挠度；检算 $L/4$ 截面时则可用上两者平均值，如已安排 $L/4$ 截面最正、负弯矩加载程序，则可采用该程序时 $L/4$ 截面挠度。但拱桥在采用 η 值根表 4-18 进行检算时，可不再另行考虑拱上建筑的联合作用。

经过荷载试验的桥梁检算系数 Z_2 值表

表 4-18

校验系数 η	检算系数 Z_2
0.4 及以下	1.20~1.30
0.5	1.15~1.25
0.6	1.10~1.20
0.7	1.05~1.15
0.8	1.00~1.10
0.9	0.97~1.07
1.0	0.95~1.05

注：① η 值应经校核确保计算及实测无误；
 ② η 值在表列数值之间时可内插；
 ③ 当 η 值大于 1 时应查明原因，若确系结构本身强度不够应适当降低检算承载能力。

当采用 Z_1 值根据公式检算不符合要求，但采用 Z_2 值根据公式检算符合要求时，可评定桥梁承载能力满足检算荷载要求。

3、地基与基础

当试验荷载作用下墩台沉降、水平位移及倾角较小，符合上部结构检算要求，卸载后变位基本恢复时，可认为地基与基础在检算荷载作用下能正常工作。当试验荷载作用下墩台沉降、水平位移及倾角较大或不稳定，卸载后变位不能恢复时，应进一步对地基、基础进行探查、检算，评价地基基础是否需进行加固。

4、结构的刚度要求

试验荷载作用下，主要测点挠度校验系数 η 应不大于 1，各点的挠度应不超过规范规定的允许值，即：

1) 圬工拱桥：全桥范围内正负挠度最大绝对值之和不大于 $L/1000$ ，履带和挂车验算时提高 20%。

2) 钢筋混凝土桥：梁桥主梁跨中挠度不超过 $L/600$ ；梁桥主梁悬臂端 $L/300$ ；桁架拱桥不超过 $L/300$ 。

5、裂缝

试验荷载作用下绝大部分裂缝宽度应不大于表 2-9 规定的允许值，荷载卸载后所有裂缝应不大于表 2-9 规定的允许值。

第五节 公路桥梁动力测定的快速评定法

荷载试验评定桥梁，可全面地反映了结构的实际状况。但是荷载试验要耗费大量的人力、物力和财力，需要较长时间中断交通。近年来广为研究的动力测定试验的快速评定方法即为其中一种。

动力法评估结构性能是近三十年来国内外研究非常活跃的领域之一。该方法具有简便、快速、无损等优点，同时具有显著的经济效益和社会效益。

动力评估方法适用于航天、航空、机械、造船、土木工程等多个领域。但在这些领域中，其研究水平发展并不平衡，如航天、航空和机械领域中已有部分研究成果应用于故障监测中，用某个振动特性参数或模式识别，对飞船、飞机或正在运转的机械进行在线故障监测，对早期故障进行预测。而在土木工程领域中，除动测法进行桩基质量检测有部分应用外，其余尚处于理论和试验研究阶段，远未达到工程应用的程度。

由于桥梁总是处于受活载作用下的运营状态，用动力法评估钢筋混凝土结构性能更能真实反映其结构在移动活载作用下的实际工作状况，对结构承载能力给出恰当的评估，研究与应用前景广阔。

结构在各种激励下的动力响应是其整体状况的一种量度。当结构的质量、刚度和阻尼特性因结构损伤(质量退化)而发生变化，其振动响应也必将发生变化，而这一变化是可以通过振动测试方法量测得到的。利用振动(动力)试验分析进行结构安全监测正是基于这一原理。近十年来，人们对利用试验模态分析技术进行结构安全评估的方法展开了广泛学入的研究，这些研究工作主要包括：对试验模型或真实结构基于动力测试方法的实测调查研究的可行性和潜力；寻求可用于结构状态指标的敏感参数、研究各种损伤检测和定位技术。

结构动力特性是结构本身所固有，可以看作为结构的“指纹”(振动特征码)，通过结构初始(安全)状态及以后不同时期的指纹的比较，即可诊断出结构的整本安全状况。桥梁结构指纹可以是频率、阻尼、振型形式，也可以是频响函数功率谱等。较早利用动力测试进行土木结构的检测时间是 20 世纪 80 年代，当时主要是研究频率的变化对结构安全性能的影响，并发展了结构评估的“频率淘汰法(FSM)”。1990 年，Salane 对公路桥梁和桥梁模型进行疲劳试验以监测结构动力特性的变化后发现，杆件的刚度与裂缝开展存在一定关系，模态参数的变化与观测到的质量退化有关；Maznrek 等通过研究发现结构损伤后，会产生新的振型，频率也相应减小，Salawu 在 1995 年对多跨公路桥梁修缮前后进行振动试验，发现阻尼的变化没有确定方向，但振型变化比较明显。

近十年来，国内研究人员对振动测试的方法也进行了大量研究。1986 年，西
安公路研究所用动测法确定简支梁抗弯刚度与静力测试进行了比较；1988 年，成都市城市建设科学研究所和华中理工大学通过模型试验，以模态分析方法对桥梁动力参数进行非线性分析，外推极限承载力；1997 年湖南大学以实测频率为基础识别桥梁刚度分布情况，从而评估桥梁的承载能力。

但是利用系统识别方法进行结构安全快速检测评定，直面临着测量噪声干扰、量测自由度不足，实测模态集不完备、结构理论模型误差，可获得的响应量测值对感兴趣的参数不敏感等许多困难。尽管如此，随着桥梁的发展，目前一般的检测方法已不能适应其安全性能和耐久性维护的迫切需要。基于动力测试方法和系统识别理论进行桥梁结构安全性能快速评定，具有广阔的应用前景。

对于一个桥梁结构来讲，它的几何尺寸、材料和边界条件是确定的，那么它的结构静力特性就唯一确定了。随着桥梁的使用，其结构工作性能会发生变化，反映出来的现象是裂缝的出现和扩展、刚度降低、变形增大。同样的，结构的各参数一经确定，其结构动力特性也唯一地确定了，随着桥梁结构工作性能的变化，它的结构动力性能的变化表现出频率和动刚度的下降、阻尼增加，振幅加大等等。因此，可以象静载试验通过桥梁的静力特性来认识结构那样，也可以通过动力试验，由桥梁的结构动力特性来认识结构，找出其内部联系，建立一套识别方法，进而对桥梁进行评定。

对于这种快速评定方法的研究关键是桥梁结构的动力特性与其承载能力之间存在着什么样的相关关系。研究的困难首先在于混凝土结构在使用中容许开裂，从不开裂到开裂，从微小裂缝到开展较大的裂缝，结构的动力特性有较大变化，并且全桥各梁的开裂情况不一样。其次是在桥梁的使用中，随着时间的推移，结构的动力特征也会有所变化。此外，桥梁边界条件的变化（例如简支梁桥主梁支座变位受到某些约束）也会影响桥梁结构的动力特性，加之关于桥梁结构动态工作机理还未得到透彻提示，因而直接寻找桥梁结构动力特征与其承载能力的关系比较困难。

已进行的研究基本上是对一座桥梁（或试验梁）分别采用静载试验和动力标定试验，然后将试验结果进行对比分析研究，主要寻找桥梁的抗弯动刚度 B_d 与抗弯静刚度 B 之间的关系，借助于抗弯静刚度来得到对桥梁各主梁在使用阶段的承载力评定。

由于桥梁的抗弯动刚度 $B_d = E_d I$ 与其自振频率有关，对于钢筋混凝土简支梁桥， B_d 可表是为

$$B_d = 0.41 f_1^2 \bar{m} l^4 \quad (4-25)$$

对于桥梁跨上作用如图 3-4 的汽车荷载的简支梁桥，桥梁的整体抗弯静刚度为

$$B = \sum_{i=1}^n \frac{48 E I_i}{l_i^3} \eta_i^2 \quad (4-26)$$

式中 n —主梁数；

m —汽车轴数；

η_i —实测荷载横向分布系数；

一阶自振频率 f_1 可以分别由动载试验和静载试验中获得，故可由式 (4-25) 和式 (4-26) 分别求得 B_d 和 B 。

已有的试验研究表明：

1) 按照钢筋混凝土梁的受力阶段, 即整体工作阶段、带裂缝工作阶段和破坏阶段, 试验梁的固有频率随荷载阶段的递进而降低。在带裂缝工作阶段, 梁的固有频率变化不大。

2) 在使用阶段(带裂缝工作阶段), 梁的抗弯静刚度 B 与 B_d 之间关系可用 $B = \beta B_d$ 来表达, 其中 β 大约在 1.1~1.4 范围内。

3) 实际旧钢筋混凝土简支梁桥的静载试验与采用跑车的动载试验表明, 行车荷载作用下各主梁静挠度分量与汽车静载作用时测量的静挠度值很接近; 行车荷载作用下实测载横向分布系数与汽车静载作用下实测荷载横向分布系数十分接近, 相差在 10% 以内。

在此基础上, 文献^[9]提出了由车载试验检测旧钢筋混凝土简支梁桥使用承载力的方法:

1) 由跑车试验测得各主梁在荷载作用下跨中的静挠度分量和动挠度分量;

2) 由于静挠度分量接近于静载时的静挠度, 以静挠度分量按计算得到静刚度 B , 而动刚度 B_d 可由动挠度分量按 (4-25) 计算得到, 经统计处理分析得到静动刚度的关系 $B = \beta B_d$;

3) 由挠度实测值计算车辆对桥梁的冲击系数 $(1 + \mu)$ 值及桥梁荷载横向分布系数 m_i ;

4) 按桥梁处于正常使用状态下, 选取容许的挠度 $[f]$;

5) 对各主梁的使用承载力进行评价。

文献^[10]的思路与文献^[9]有所不同, 提出了一种动力分解法的概念, 即通过动力分解, 将单梁动刚度从整体结构中分解出来, 再建立单梁动刚度与单梁静刚度的关系, 以此进行整体结构的评估。基本思路如图 4-3 所示。

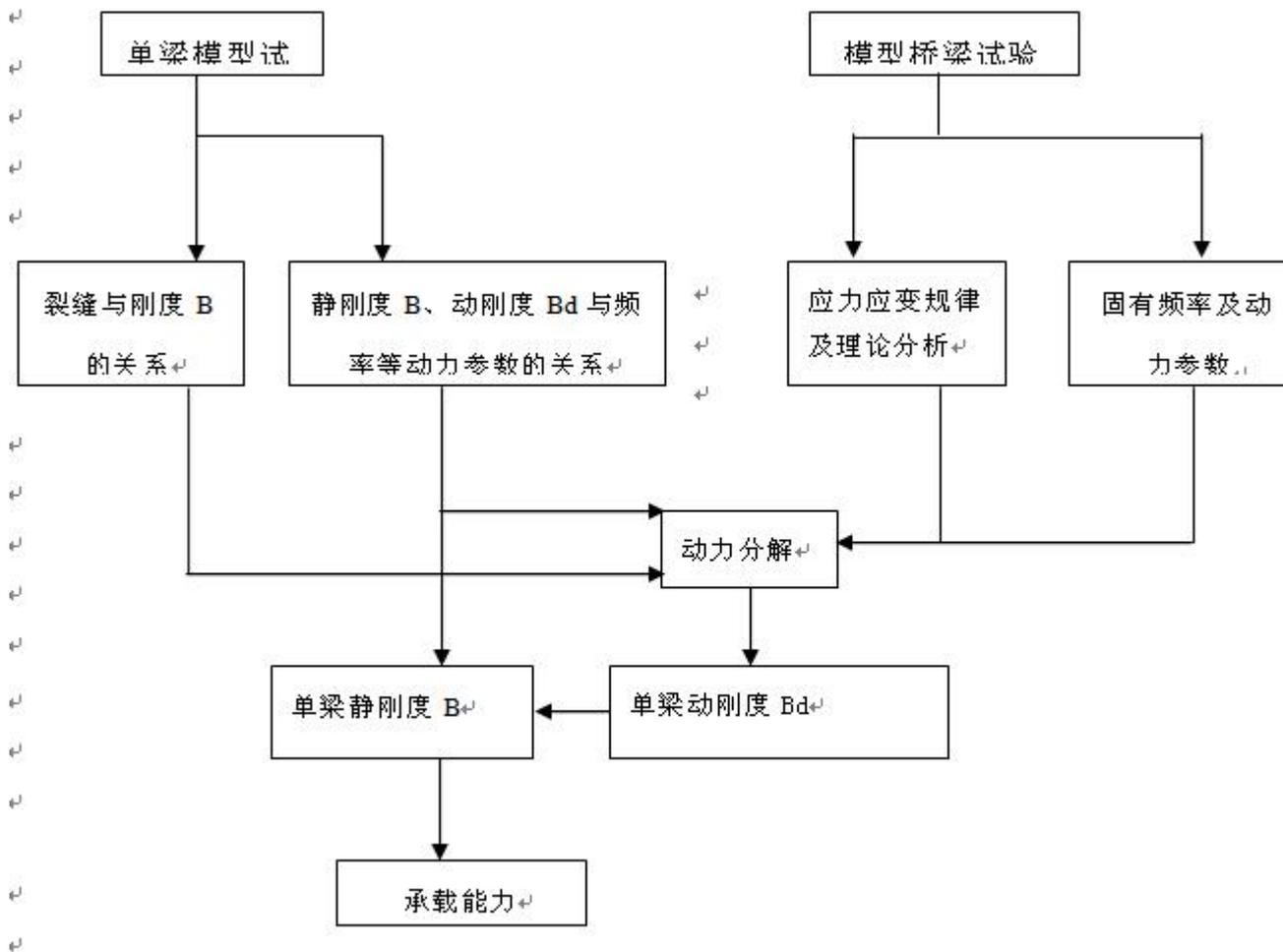


图 4-3 动力分解法的基本思路

用动力测定试验快速评定桥梁还处于研究阶段，国内的研究很热，但据实际应用还有很长的路要走。

第六节 公路桥梁的专家系统评定

桥梁的评定，涉及到许多因素的复杂影响。在评定时，应兼顾各个方面，要做出任何一个决策，都必须对诸多相关因素综合考虑。故若要对桥梁进行定量的综合评价，则必须建立一个非常复杂的数学模型，而目前我们对于桥梁结构的养护知识还远不足以建立这样一个完善的模型。故以分析计算为主的评定方法目前只能做到对桥梁某些基本构件使用状况的定量分析，而且在分析中还引入了比较粗糙的修正系数。如今，对于桥梁的综合评价引入了一种新的方法——专家系统评定方法，该方法的出发点是专家对桥梁评估时的思路。

专家对于桥梁的评定，主要是依靠其经验（依据和思路）。当专家们对一座桥梁进行评估时，他们往往首先选择一些对整个桥梁结构有着关键影响的构件、节点进行检查与评估。如主梁是影响钢筋混凝土简支梁桥结构的主要构件之一，在具体评估主梁时，尽管可以量到钢筋混凝土主梁的某条裂缝的具体尺寸，但仍然很难由此找到这条裂缝尺寸与主梁安全之间的解析关系。但专家往往能够首先由裂缝尺寸及其它相关信息；借助丰富经验，可以得到裂缝状况是“好”或“坏”的概念。接着再综合桥梁整体结构形式、技术档案资料和现场调查所得各种实测数据，对桥梁状况得出“好”或“差”，“安全”或“不安全”等结论。

专家系统评定可归于模糊评价的范畴。专家对于桥梁的决策性评价，避开了定量分析，使用了模糊的语言变量，利用模糊概念来处理复杂问题（复杂性越高，有意义的精确化能力一般便越低即意味着系统具有的模糊性越强）。因而，用模糊概念辨别复杂事物本质，往往反而利于辨清真相，这种思路最终发展为评定方法。

专家咨询系统（EXPERT CONSULTING SYSTEM）或专家系统（EXPERT SYSTEM），就是与专家经验的水平相当，解决专门问题的计算机软件系统。其主要特点有：

- 1、主要用于知识信息处理，依靠知识来表达技术而非简单的数学描述；
- 2、通过知识的获取、表达、存储和编排建立知识库及相应管理系统以备随时调用；
- 3、系统在环境模式下进行推理；而非在固定程序控制下单纯的执行指令。
- 4、不仅解答用户的提问，而且对推理过程出解释，并提供答案的可信度估计。

专家系统的示意简图见图 4-4。系统主要由七部分组成。

1、知识库是系统的核心部分，是解决问题的基础。其储藏了某些专家或专家集体在桥梁养护某些领域的宝贵知识（包括事实、经验、判断等）。知识库应由熟悉专家系统的人工智能工程师与桥梁养护领域资深专家合作建立。可通过“人工移植”、“专题面谈”、“口语记录分析”等方法获取知识，经整理后，输入知识库。

2、推理机构是系统的重要部分，亦是解决问题的基础。其具有推理能力，能理解问题，并把知识和问题相互对应起来进行推理，最后解决问题；

- 3、输入接口包括键盘、数字化仪等；
- 4、输出接口包括显示器、打印机、绘图仪等；
- 5、编辑程序：使用户对知识库中的事实与规则进行补充、修改或删除；
- 6、黑板：用于记录推理过程的中间结果；

7、解释程序：为用户查询系统的工作状态和推理过程提供各种查询命令

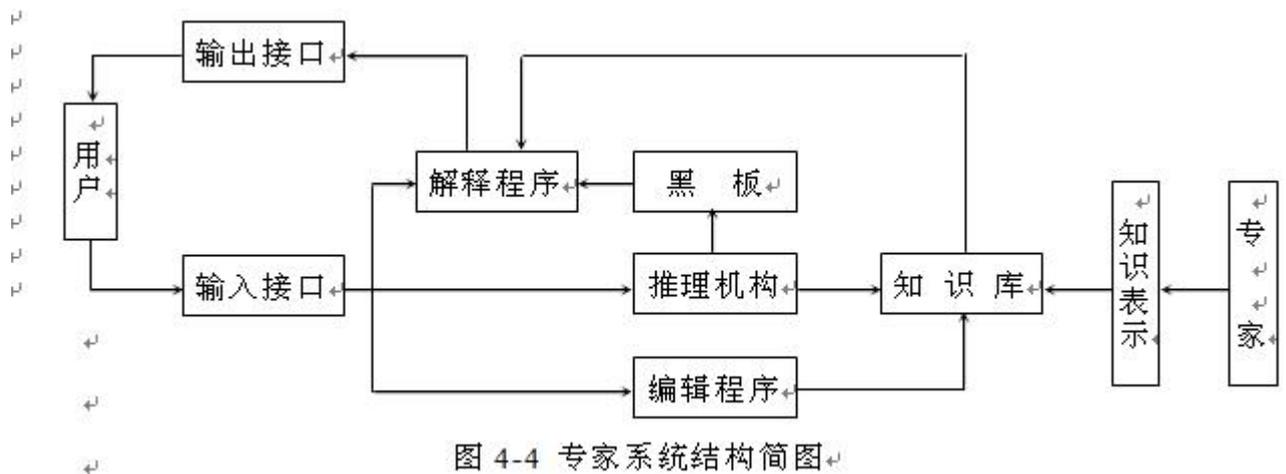


图 4-4 专家系统结构简图

专家系统是基于计算机软件的知识工程系统，其设计、开发一般步骤如下：

1、确定问题阶段——人工智能工程师与桥梁养护专家应明确待开发专家系统要解决的问题，并且制订出研究计划。这样可以大致估计出系统的框架规模，并且依此有针对性的确定研究方法、步骤及可能出现的问题。

2、概念化阶段——桥梁养护专家向人工智能工程师阐明解决该问题所需要的关键概念和关系等，并将复杂问题分层、分单元概念化表述，得到一些因素关系图式及相应的非正式说明。例如在评价钢筋混凝土结构的可靠性时，可由桥梁养

护专家利用层次分析法，将抽象化的、难以定量测量的钢筋混凝土构件的可靠性逐层分解为可以利用现代化的检测技术和手段进行现场检测的各种指标，建立钢筋混凝土构件可靠性评价层次图（图 4-5），层次结构划分如下：

T0(总目标层)——以钢筋混凝土桥梁构件可靠性为评估总目标，提供决策性依据；

S0（子目标层）——对钢筋混凝土构件安全性、适用性和耐久性进行评估；

R（准则层）——对隶属于评估子目标的影响指标的分类；

I（指标层）——子目标中便于直接检测、量化和定性描述的评估指标

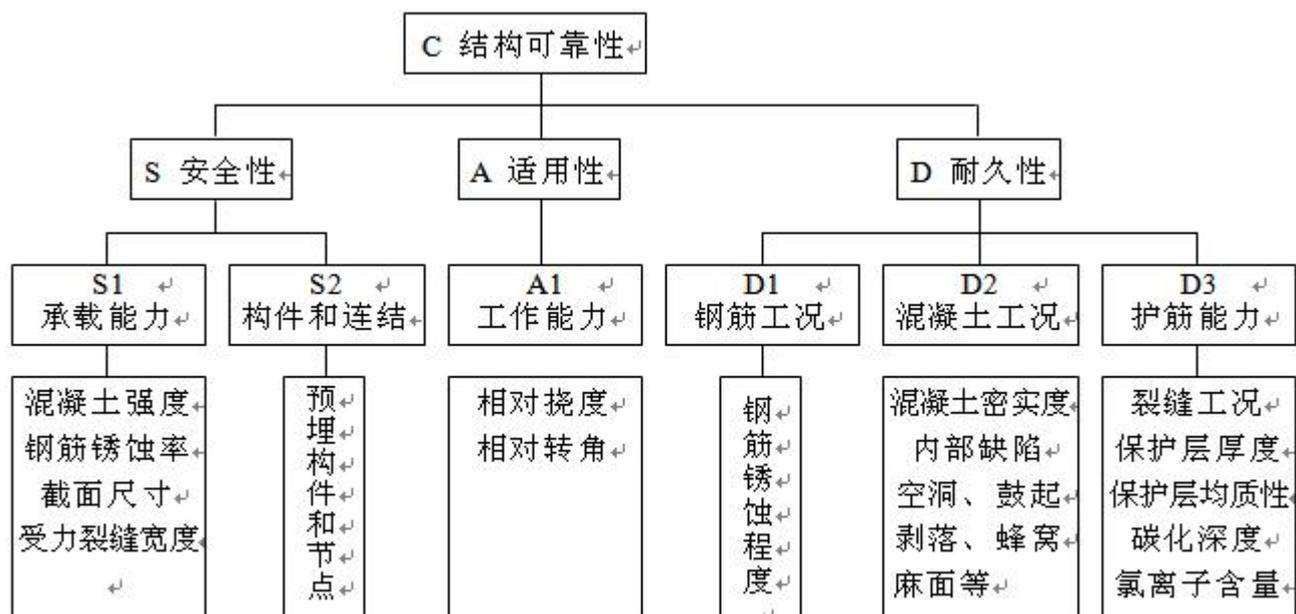


图 4-5 钢筋混凝土构件可靠性评价层次图

3、形象化阶段——人工智能工程师组织知识结构，确定知识表示和推理方法。

4、实现阶段——人工智能工程师先把形象化的知识编写成程序形式的知识库，然后设计推理机制和人机对话系统（即编写一个原型专家系统）

5、测试阶段——人工智能工程师和桥梁养护专家一起评价原型专家系统的性能并进行修改以满足用专家水平解决问题的要求。一般通过许多由桥梁养护专家选择的例子来测试，力图暴露专家系统的弱点和错误，最后制成实用的专家系统。

注：实际运作中，以上步骤是灵活的，交叉的、反复的，有反馈的闭环过程。