第59卷第5期
2019年9月

大连理工大学学报
Journal of Dalian University of Technology

Vol. 59, No. 5
Sept. 2019

文章编号：1000-8608(2019)05-0526-10

单层工业厂房上部承重结构体系可靠性评定方法

何化南*[1]， 杜彦成[1]， 幸坤涛[2]

（1. 大连理工大学 海岸和近海工程国家重点实验室，辽宁 大连 116024；
2. 中冶建筑研究总院有限公司，北京 100088）

摘要： 为评定单层工业厂房上部承重结构可靠性，提出了一种将层次分析法(AHP)与灰色聚类分析法相结合的可靠性评估方法. 依据《工业建筑可靠性鉴定标准》(GB 50144—2008)相关规定，提出采用承载功能、结构整体性、使用状况、结构水平位移作为灰色聚类分析的聚类指标，并采用层次分析法确定各指标对结构体系可靠性影响的权重；采用层次分析法，充分考虑构件的位置、类型对上部承重结构可靠性的影响程度差异，确定构件权重系数，评定上部承重结构承载功能等级；提出聚类指标灰类等级划分标准，并根据厂房现状及承载能力验算结果，为聚类指标赋予白化数；通过聚类分析，构造聚类向量，按最大隶属度原则，确定结构体系可靠性等级及隶属度. 工程实例验证表明，依据所提方法所得评定结果与 GB 50144—2008 评定结果一致，能够满足工程实际的应用.

关键词： 单层工业厂房；上部承重结构；可靠性；层次分析法；灰色聚类分析

中图分类号： TU312.3 **文献标识码：** A **doi：** 10.7511/dllgxb201905012

0 引 言

工业建筑是工业生产的重要基础设施，其可靠性直接影响企业能否正常进行生产. 我国钢铁、化工、机械、建材、纺织等诸多行业内，工业建筑长期超负荷承受吊车荷载、积灰荷载、平台操作荷载等作用，并且持续处于高温、腐蚀等不利环境下工作，这种情况已对结构的安全性和使用性产生了严重影响[1]，因而需要对这些建筑进行可靠性评定并采取必要的维修、加固或拆除等措施.

许多专家学者对于工业厂房的可靠性评价方法已开展了大量研究工作. 目前，主要的评价方法有实用鉴定法、概率论方法[2-3]、模糊评判法[4-5]. 其中我国工业建筑可靠性评定依据的主要标准《工业建筑可靠性鉴定标准》(GB 50144—2008)[6]，采用的便是实用鉴定法. 该标准将工业厂房划分为地基基础、上部承重结构和围护结构 3 个子系统，分别评定其可靠性等级，再对工业厂房整体进行可靠性等级划分. 其中上部承重结构从承载功能和结构整体性两方面进行安全性评定，再结合使用性评定结果，确定其可靠性等级. 这种方法容易理解，操作简单，但是评定结果仅划分为 4 个等级，缺乏对结构可靠性状态的量化反映.

此外，层次分析法、灰色理论方法也逐渐被应用到工业厂房的可靠性鉴定中. 陈少杰等[7]较系统地研究了层次分析法在结构体系可靠性评估中的应用，结果表明，通过引入层次分析法确定构件权重，对结构体系可靠性评定的结果较《工业建筑可靠性鉴定标准》(GB 50144—2008)更为合理. 顾祥林等[8]则提出同种构件在一层结构中的作用和地位基本相同，因而同种构件的权重系数应该相同或者差别不大，并计算出了单层工业厂房中不同类型构件的权重比，该方法已写入上海市地方标准《既有建筑物结构检测与评定标准》(DG/TJ 08-804—2005)[9].

王威等[10]将灰色聚类分析引入建筑结构可

收稿日期： 2019-04-02； **修回日期：** 2019-07-22.
基金项目： 国家重点研发计划资助项目(2016YFC0701301).
作者简介： 何化南*(1972-)，女，博士，副教授，E-mail：hehuanandl@163.com；幸坤涛(1973-)，男，博士，教授级高工，E-mail：xingkuntao@163.com.

靠性评定，阐述了用灰色聚类分析方法评价建筑结构可靠性的原理和步骤，并以 5 个工业厂房作为工程实例进行验证，证明了其可行性，但是通过计算聚类权来表示各聚类指标在工业厂房上部承重结构可靠性评定中的权重，所得结果与工程经验偏差较大，而且没有详细阐明如何确定结构体系的抗力/荷载效应对应的白化数. 郭小东等[11]则将灰色系统理论和模糊数学理论相结合，采用灰色模糊关系向量和评价指标权重向量计算木结构的结构体系安全性综合评估值，可以综合考虑不同损伤对构件安全性的影响程度以及不同安全性等级的构件对结构体系安全性的影响程度；之后，他们又将灰色聚类分析和层次分析法相结合，采用层次分析法确定各评价指标权重，再通过聚类分析获得木结构的结构体系安全性等级隶属度向量，避免将结构简单划分等级，可以让评定结果更全面、量化地反映结构整体情况[12].

本文在采用灰色聚类分析法评定上部承重结构可靠性的过程中，引入层次分析法确定各聚类指标在上部承重结构可靠性评定中的权重系数，并评定承载功能等级，一定程度上弥补文献[10]的不足. 同时，采用灰色聚类分析法求得单层工业厂房上部承重结构对各可靠性等级的隶属度向量，以期评定结果相比现行《工业建筑可靠性鉴定标准》(GB 50144—2008)更能体现量化效果.

1　灰色聚类分析的基本原理及应用

1.1　灰色聚类分析的基本原理

灰色聚类分析将聚类对象对于不同聚类指标的白化数，按数个灰类进行归纳，从而判断聚类对象所属的灰类[13].

记 $A_1, A_2, \cdots, A_i, \cdots, A_m$ 为聚类对象；$B_1, B_2, \cdots, B_j, \cdots, B_n$ 为聚类指标；Ⅰ，Ⅱ，Ⅲ，…，k，… 为聚类灰类；d_{ij} 为第 i 个聚类对象对第 j 个聚类指标的白化数；f_{jk} 为第 j 个聚类指标对第 k 个灰类的白化函数. 则灰色聚类分析的步骤如下：

(1)确定 d_{ij}，并构造样本矩阵.

(2)确定不同灰类的白化函数，常见的白化函数曲线如图 1 所示.

(3)求聚类权 η_{jk}，第 j 个聚类指标对第 k 个灰类的权为

$$\eta_{jk} = \lambda_{jk} \Big/ \sum_{j=1}^{n} \lambda_{jk} \tag{1}$$

(4)求聚类系数 σ_{ik}，表示第 i 个聚类对象对第 k 个灰类的聚类系数：

$$\sigma_{ik} = \sum_{j=1}^{n} f_{jk}(d_{ij})\eta_{jk} \tag{2}$$

(5)构造聚类向量

$$\boldsymbol{\sigma}_i = (\sigma_{i1} \quad \sigma_{i2} \quad \sigma_{i3} \quad \sigma_{i4}) \tag{3}$$

(6)聚类分析. 根据最大隶属度原则，在 $\boldsymbol{\sigma}_i$ 中挑选最大值判断聚类对象所属灰类.

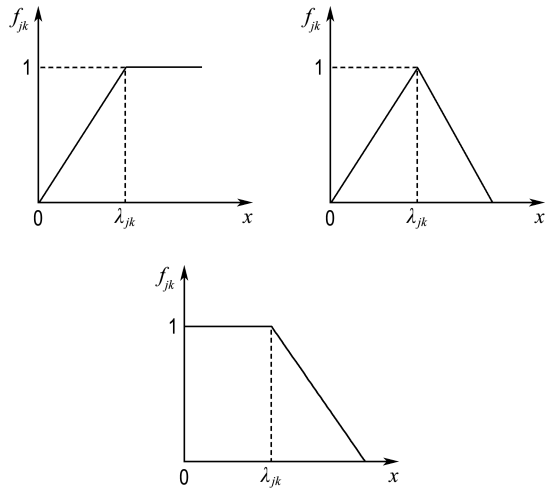

图 1　常见的白化函数曲线

Fig. 1　Common whitening function curves

1.2　确定聚类指标及灰类等级

对于单层工业厂房上部承重结构的可靠性评定，《工业建筑可靠性鉴定标准》(GB 50144—2008)分别从安全性、使用性两方面各自评定等级，再综合评定可靠性等级，其中影响安全性的因素包括承载功能和结构整体性，影响使用性的因素包括使用状况和结构水平位移. 相对应的，本文采用上述 4 个因素作为灰色聚类分析的聚类指标.

如表 1 所示，同时结合文献[10]，取构件抗力/荷载效应比小于 0.8 时，相应的 D 灰类的白化函数取值为 1.

4 个聚类指标的分级及量化标准参照文献[10]，整理后各聚类指标的灰类等级划分如表 2 所示. 各聚类指标的白化数由专家根据结构现状进行评分确定.

参照图 1，可得钢结构厂房承载功能对应的

各灰类的白化函数曲线如图 2 所示，钢筋混凝土结构或砌体结构厂房承载功能对应的各灰类的白化函数曲线如图 3 所示，其他聚类指标对应的各灰类的白化函数曲线如图 4 所示.

表 1 构件承载能力($R/\gamma_0 S$)评定等级

Tab. 1 Component bearing capacity ($R/\gamma_0 S$) rating

结构类别	构件等级			
	a	b	c	d
钢结构	≥1.00	<1.00,≥0.95	<0.95,≥0.90	<0.90
混凝土或砌体结构	≥1.00	<1.00,≥0.90	<0.90,≥0.85	<0.85

表 2 各聚类指标的灰类等级划分

Tab. 2 Grey classification of each clustering index

聚类灰类	聚类指标			
	承载功能	结构整体性	使用状况	结构水平位移
A	≥1.00	<1.00,≥0.75	<1.00,≥0.75	<1.00,≥0.75
B	<1.00,≥0.95(<1.00,≥0.90)	<0.75,≥0.50	<0.75,≥0.50	<0.75,≥0.50
C	<0.95,≥0.90(<0.90,≥0.85)	<0.50,≥0.25	<0.50,≥0.25	<0.50,≥0.25
D	<0.90(<0.85)	<0.25	<0.25	<0.25

注：括号内为钢筋混凝土结构和木结构对应的承载功能灰类等级划分标准.

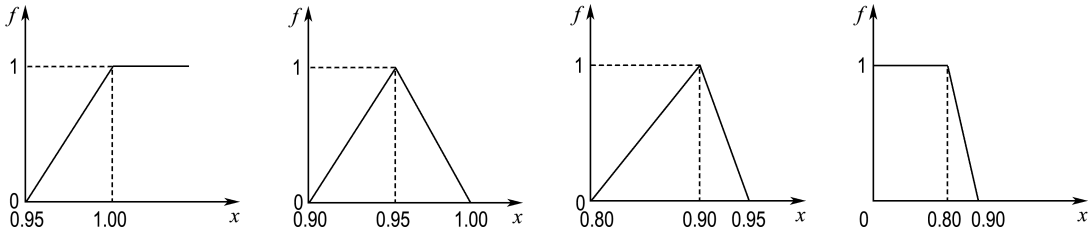

图 2 钢结构承载功能白化函数

Fig. 2 Whitening function of steel structure bearing function

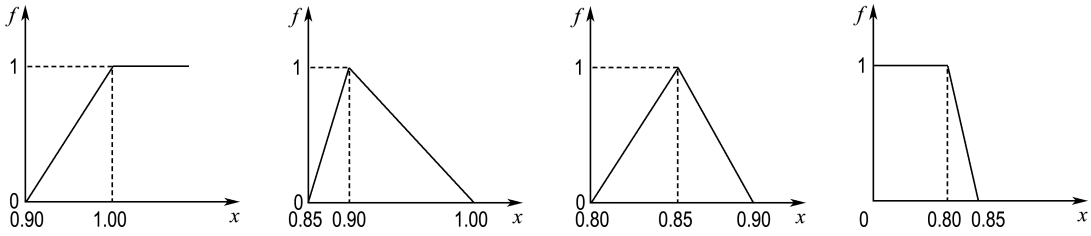

图 3 钢筋混凝土或砌体结构承载功能白化函数

Fig. 3 Whitening function of reinforced concrete or masonry structure bearing function

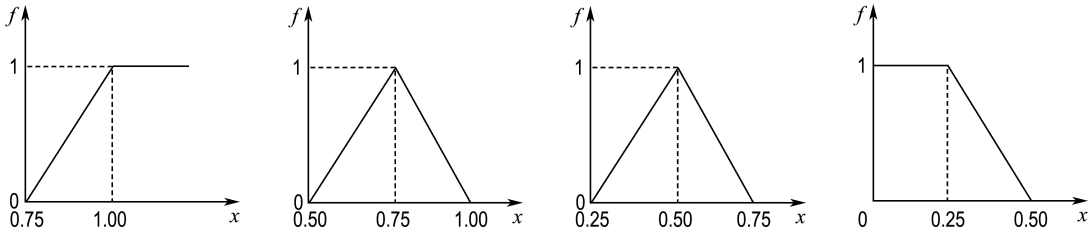

图 4 其他聚类指标白化函数

Fig. 4 Whitening function of other clustering indexes

2　层次分析法的基本原理及应用

2.1　层次分析法的基本原理

层次分析法是由 Saaty 提出的定性分析与定量计算相结合的系统分析与决策方法[14]，其基本思想是将若干因素对同一目标的影响程度，归结为以数值表示的它们在目标中占的权重. 若要比较 n 个因素 $\boldsymbol{U}=(U_1 \quad U_2 \quad \cdots \quad U_n)$ 对目标Ⅰ的影响，确定各个因素在Ⅰ中占的比重，其基本步骤如下：

(1)建立层次分析结构

对单层工业厂房上部承重结构进行可靠性分析，需要首先根据构件安全性等级评定上部承重结构系统的承载功能等级，其次根据承载功能、结构整体性、使用状况和结构水平位移 4 个指标综合评定上部承重结构可靠性状态. 因而需要建立层次模型，逐步评定. 本文建立的层次分析结构如图 5 所示.

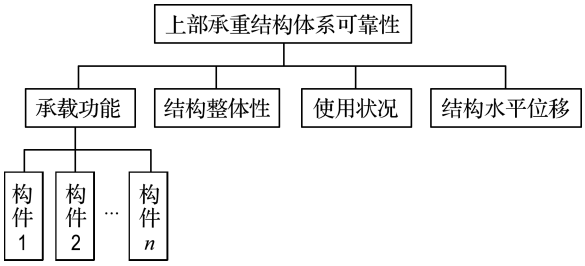

图 5　层次分析结构

Fig. 5　Hierarchical analysis structure

(2)构造判断矩阵

每次选取两个因素 U_i、U_j，用 c_{ij} 表示 U_i 与 U_j 对Ⅰ的影响程度之比，构造判断矩阵：

$$\boldsymbol{C}=(c_{ij})_{n\times n} \tag{4}$$

且满足 $c_{ij}>0, c_{ji}=1/c_{ij}, c_{ii}=1,\ i,j=1,2,\cdots,n$.

层次分析法常用 1～9 标度方法描述两因素的权重比值，形成上述判断矩阵. 判断矩阵标度如表 3 所示.

表 3　判断矩阵标度

Tab. 3　Judgment matrix scale

重要性等级	c_{ij}	重要性等级	c_{ij}
相同	1	很强	7
稍强	3	绝对强	9
强	5		

注：介于两个等级之间可根据实际情况和定性分析进行取值.

(3)各影响因素权重计算

计算判断矩阵的最大特征值 $\lambda_{\max}$ 及其对应的特征向量，该特征向量归一化后为

$$\boldsymbol{\omega}=(\omega_1 \quad \omega_2 \quad \cdots \quad \omega_n)^{\mathrm{T}} \tag{5}$$

其中 $\sum_{i=1}^{n}\omega_i=1$.

文献[15]证明向量 $\boldsymbol{\omega}$ 即为权重向量，表示 $U_1, U_2, \cdots, U_n$ 在目标Ⅰ中占的比重.

(4)对判断矩阵进行一致性检验

层次分析法采用 I_c 作为度量判断矩阵脱离一致性的指标，即

$$I_c=\frac{\lambda_{\max}-n}{n-1} \tag{6}$$

I_c 越大，表明判断矩阵偏离完全一致性的程度越大；I_c 越小(最小为 0)，表明判断矩阵的一致性越好.

I_c 反映了判断矩阵的一致性程度，但是不能反映其一致性是否满足要求. 为衡量不同阶判断矩阵是否具有满意的一致性，另外引入判断矩阵的平均随机一致性指标 I_r. I_r 是大量同阶随机互反矩阵一致性指标 I_c 的平均值. 对于 1～9 阶判断矩阵，I_r 的取值列于表 4.

表 4　平均随机一致性指标

Tab. 4　Average random consistency indicator

阶	I_r	阶	I_r
1	0	6	1.24
2	0	7	1.32
3	0.58	8	1.41
4	0.90	9	1.45
5	1.12		

将判断矩阵的一致性指标 I_c 与同阶平均随机一致性指标 I_r 之比称为随机一致性比率，记为 R_c. 当 $R_c=I_c/I_r<0.10$ 时，即认为判断矩阵具有满意的一致性，否则就需要调整判断矩阵，直至使之具有满意的一致性.

2.2　上部承重结构承载功能评定

上部承重结构体系的承载功能评定可参考文献[8]，采用层次分析法，综合考虑各构件的安全性等级进行评定. 具体步骤为

(1)根据《工业建筑可靠性鉴定标准》(GB 50144—2008)对单层工业厂房上部承重结构进行承载能力验算，评定构件安全性等级.

(2)按式(7)确定各类构件对于上部承重结构

承载功能的影响权重系数 ω_i：

$$\omega_i = \frac{r_i}{\sum n_i r_i} \tag{7}$$

其中 ω_i 代表 i 类构件中每根构件的权重比；r_i 表示 i 类构件的权重比，如表 5 所示；n_i 表示 i 类构件的数量.

表 5 单层工业厂房不同类型构件权重比值

Tab. 5 The weight ratio of different types of components for single-story industrial building

厂房类型	r_i				
	边柱	中柱	屋架	屋面板	吊车梁
构件类型齐全	3.57	6.00	1.89	1.00	1.89
无吊车梁	3.73	6.44	2.00	1.00	—
屋面板不承重	1.82	3.02	1.00	—	1.00

(3)计算各安全性等级构件的权重总和，并用 Γ_k 表示：

$$\Gamma_k = \sum_{i_k=1}^{n_k} \omega_{i_k} \tag{8}$$

其中 k 代表构件安全性等级，分 a、b、c、d 4 个等级；i_k 代表安全性等级为 k 级的构件的编号；n_k 代表安全性等级为 k 级的构件总数；ω_{i_k} 代表安全性等级为 k 级的构件的权重系数，由 ω_i 确定.

(4)根据式(8)计算结果，按表 6 确定上部承重结构的承载功能等级. 表 6 所示的承载功能分级标准根据《工业建筑可靠性鉴定等级》(GB 50144—2008)第 7.3.4 节重要构件集承载功能等级划分标准制定.

表 6 上部承重结构承载功能分级标准

Tab. 6 Evaluation criteria for the bearing capacity of upper load-bearing structures

承载功能等级	评定标准
A	$\Gamma_b \leqslant 0.3$ 且 $\Gamma_c = 0$，$\Gamma_d = 0$
B	$\Gamma_c \leqslant 0.2$ 且 $\Gamma_d = 0$
C	$\Gamma_c \leqslant 0.5$ 且 $\Gamma_d \leqslant 0.1$
D	$\Gamma_c > 0.5$ 或 $\Gamma_d \geqslant 0.1$

2.3 层次分析法确定评价指标权重

如 1.2 所述，本文将承载功能、结构整体性、使用状况和结构水平位移作为灰色聚类分析的聚类指标，若按 1.1 步骤(3)确定各指标的聚类权，则结果如表 7 所示.

由表中数据可以看出，各聚类指标在不同灰类的聚类权差异显著，与工程经验并不相符. 为此，本文采用层次分析法，更合理地确定各聚类指标的权重，以替代步骤(3).

表 7 各聚类指标的聚类权

Tab. 7 Clustering rights of each clustering index

聚类灰类	聚类权			
	承载功能	结构整体性	使用状况	结构水平位移
A	0.25	0.25	0.25	0.25
B	0.30	0.23	0.23	0.23
C	0.38	0.21	0.21	0.21
D	0.52	0.16	0.16	0.16

以承载功能、结构整体性、使用状况和结构水平位移作为比较因素，并根据式(4)构造判断矩阵 $\boldsymbol{C}$，计算各聚类指标的权重并进行一致性检验. 判断矩阵 $\boldsymbol{C}$ 的计算结果见表 8. 由表 8 可知，判断矩阵 $\boldsymbol{C}$ 满足一致性要求，各因素权重向量 $\boldsymbol{\omega} = (0.33\quad 0.33\quad 0.17\quad 0.17)^{\mathrm{T}}$，$\lambda_{\max} = 4$，$I_c = 0$，$R_c = 0 < 0.1$.

表 8 判断矩阵 $\boldsymbol{C}$ 及其检验结果

Tab. 8 Judgment matrix $\boldsymbol{C}$ and its test results

评价指标	承载功能	结构整体性	使用状况	结构水平位移	权重
承载功能	1	1	2	2	0.33
结构整体性	1	1	2	2	0.33
使用状况	1/2	1/2	1	1	0.17
结构水平位移	1/2	1/2	1	1	0.17

相应的，上部承重结构对各灰类的聚类系数计算由式(2)调整为

$$\sigma_{ik} = \sum_{j=1}^{n} f_{jk}(d_{ij})\omega_j \tag{9}$$

3 工程实例

为验证本文方法的可行性与准确性，取一工程实例，分别用本文方法与现行《工业建筑可靠性鉴定标准》(GB 50144—2008)进行可靠性评定，并比较评定结果.

3.1 工程概况

太原某钢厂拟进行硅钢冷连轧配套技术改造，为保证厂房结构改造后的使用安全，厂方委托北京某检测中心对连铸车间钢水接受跨(FG)、浇铸跨(GH)进行结构检测鉴定，提出厂房结构处理意见，检测区域如图 6 实线框所示.

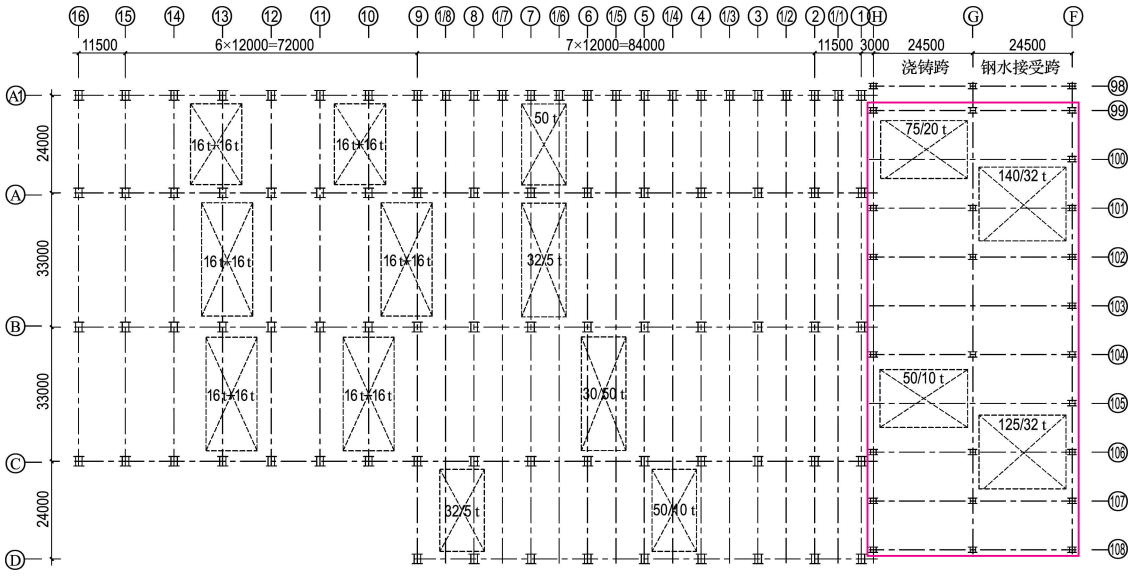

图 6　连铸车间厂房平面图

Fig. 6　Floor plan of the continuous casting workshop

根据设计资料，该厂房钢水接受跨(FG)、浇铸跨(GH)可单独划分为一个鉴定单元，为单层钢排架结构. 该排架结构主要构件包括排架柱、吊车梁、屋架，其中排架柱为斜腹杆 H 形双肢组合钢柱，材料采用 A3F 镇静钢；浇铸跨 12 m 吊车梁采用 3 号镇静钢，截面尺寸为 HN1 800 mm×700 mm×16 mm×28 mm，接受跨所有吊车梁及浇铸跨 24 m 吊车梁采用 16Mn 钢，截面尺寸为 HN3 140 mm×800 mm×20 mm×30 mm；屋面系统采用桁架式钢屋架，材料采用 A3F 镇静钢；屋面板为轻型压型钢屋面板.

3.2　现场检测结果

3.2.1　荷载状况　经过现场检查、核实，得出荷载状况如下.

(1)永久荷载：结构构件、设备自重根据现场检测结果，参考原设计、变更设计、扩建设计、加固设计图纸及维修资料计算确定.

(2)可变荷载：屋面活荷载标准值取为 0.5 kPa；屋面积灰荷载标准值，挡风板内取为 0.75 kPa，挡风板外取为 0.3 kPa；风荷载标准值取为 0.4 kPa，地面粗糙度类别为 C 类；雪荷载标准值取为 0.35 kPa.

(3)吊车荷载：钢水接受跨由东向西依次设置有 1 台 140 t/32/10 t、1 台 125 t/32 t 的重级工作制软钩桥式吊车；连铸车间钢水浇铸跨由东向西依次设置有 1 台 75 t/20 t、1 台 50 t/10 t 的重级工作制软钩桥式吊车. 吊车起吊重物时，作用于吊车梁上荷载的动力系数取 1.1.

(4)地震作用：场地类别为Ⅲ类，抗震设防烈度为 8 度，设计基本地震加速度值为 0.2g，设计地震分组为第一组.

3.2.2　构件材料性能　根据现场抽检结果，G/99 柱腹板厚度平均值为 20.3 mm(原设计 20 mm)，F/99 柱腹板厚度为 18.2 mm(原设计 18 mm)，截面尺寸偏差在《热轧钢板和钢带的尺寸、外形、重量及允许偏差》(GB/T 709—2008)允许范围内；钢构件表面温度均低于 150 ℃，可忽略温度对结构承载能力的影响；采用硬度法测试钢材抗拉强度，均满足原设计要求.

3.2.3　构件损伤　经过现场检查，厂房柱目前使用状态基本良好，排架柱的截面尺寸及布置与原设计基本相符，主要存在如下损伤：G/99 柱柱脚锈蚀严重；F/99 柱的柱脚和走道板附近存在锈蚀现象；H/108 柱的中部存在腐蚀掉漆现象；G/99、G/106 柱缀条被切除；G/107 柱的缀条弯曲变形.

部分柱间支撑存在杆件切除、弯曲变形现象：F/107-108 柱间支撑形式与原设计不符，底部被切除一肢；G/107-108、H/107-108 柱间支撑形式与原设计不符，部分杆件弯曲变形；F/103-104 柱间支撑底部被切除一肢.

屋盖系统基本完好，个别屋架间交叉支撑存在弯曲变形、被切除现象；F-G/105 轴线屋架一根

腹杆弯曲变形.

钢水接受跨吊车梁系统损伤严重,F/103-104、F/104-105 上翼缘与腹板多处出现严重疲劳损伤,疲劳裂缝最大已深入腹板内部约 300 mm 长,101/G、104/G、106/G 的支座端部圆弧段下翼缘与腹板连接处出现疲劳裂缝.

3.3 构件承载能力验算

根据原设计及上述检测结果,任取该厂房一榀,采用 PKPM 软件建模计算. 屋架视为桁架结构,与上柱铰接. 各构件应力比如图 7 所示,图中数字表示构件强度计算应力比,圆圈内数字表示该杆件平面内稳定应力比超限及其平面内稳定应力比数值. 由图可知,该厂房排架柱、屋架等构件强度验算满足承载能力要求,但是屋架腹杆失稳,且该腹杆位置与现场检查中发现的弯曲变形的腹杆位置相同.

根据 PKPM 计算结果,排架柱抗力/荷载效应比满足 a 级标准,但是考虑到构件损伤对于构件承载能力的削弱,将 F/99、G/99、G/106、G/107、H/108 柱安全性评为 b 级,其他排架柱评为 a 级;屋架所有构件的抗力/荷载效应比达到 a 级标准,考虑到个别腹杆失稳对屋架安全性的影响,将屋架安全性等级评为 b 级.

根据《工业建筑可靠性鉴定标准》(GB 50144—2008),钢构件有裂缝时,安全性应评为 c 级或 d 级;吊车梁受拉区有裂缝时,安全性应评为 d 级. 因而将 F/103-105、G/99-107 吊车梁安全性评为 d 级. 随机抽取未出现裂缝的吊车梁,采用 PKPM 工具箱中的吊车梁设计模块进行承载能力验算,抗力/荷载效应比结果如表 9 所示,因而其他吊车梁安全性等级评为 a 级.

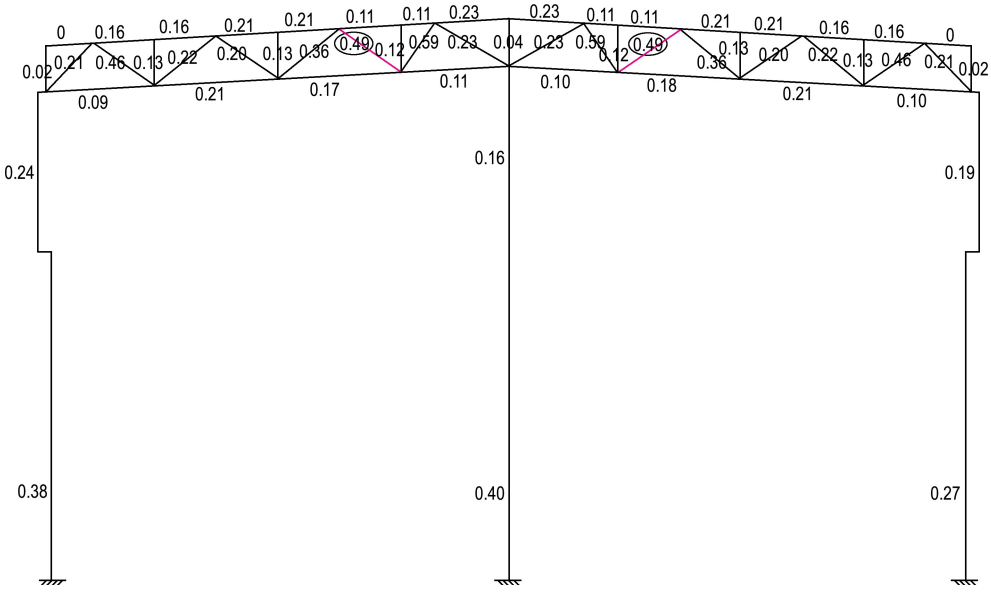

图 7 构件应力比

Fig. 7 Component stress ratio

表 9 吊车梁承载能力($R/\gamma_0 S$)验算

Tab. 9 The bearing capacity ($R/\gamma_0 S$) verification of crane beam

吊车梁位置	截面	跨度/m	吊车起重量	上翼缘抗压强度验算结果	下翼缘抗拉强度验算结果	端部腹板抗剪验算结果	腹板局部抗压验算结果
F/99-100	HN1 800 mm×700 mm×16 mm×28 mm	12	140 t+125 t	1.37	1.67	1.08	2.09
H/99-101	HN3 140 mm×800 mm×20 mm×30 mm	24	75 t+50 t	1.37	1.96	2.78	4.54

综上，各构件安全性等级整理后如表 10 所示.

表 10　构件安全性等级评定结果

Tab. 10　Component safety rating results

构件类型	构件等级	数量
边柱	a	15
	b	2
中柱	a	4
	b	3
屋架	b	38
吊车梁	a	20
	d	7

3.4　聚类灰类等级评定

本例中厂房屋面板为不上人压型钢屋面板，屋面板不承重，根据式(7)及表 5，计算可得边柱权重系数为

$$\omega_{sc}=1.82/(1.82\times17+3.02\times7+1.00\times38+1.00\times27)=0.015\ 6$$

同理可得其他构件权重系数，整理后如表 11 所示.

表 11　构件权重系数

Tab. 11　Weight coefficient of components

构件类型	构件等级	数量	权重系数
边柱	a	15	0.015 6
	b	2	0.015 6
中柱	a	4	0.025 8
	b	3	0.025 8
屋架	b	38	0.085 0
吊车梁	a	20	0.085 0
	d	7	0.085 0

根据式(8)，可知该厂房各安全性等级的构件权重之和分别为 $\Gamma_a=(1.56\times15+2.58\times4+0.85\times20)\times10^{-2}=0.51$，$\Gamma_b=(1.56\times2+2.58\times3+0.85\times38)\times10^{-2}=0.43$，$\Gamma_c=0$，$\Gamma_d=0.85\times7\times10^{-2}=0.06$.

对照表 6，可知该厂房上部承重结构承载功能灰类等级应评为 C 级. 参照表 2，白化数取 $0.95-0.05\times0.06/0.1=0.92$.

此外，根据 3.2.3 所述现场损伤检查结果，该厂房结构布置基本合理，能够形成完整的体系，不影响结构安全，但部分柱间支撑存在与原设计不符，个别杆件切除、弯曲变形现象，个别屋架间水平支撑存在弯曲变形、被切除现象，因而将结构整体性灰类等级评为 B 级，白化数取 B 级白化数区间的中间值，为 0.625.

由于部分吊车梁疲劳损伤严重，必须及时采取措施，在对吊车梁进行加固或更换过程中，会对厂房的正常使用产生显著影响，因而使用状况灰类等级评为 C 级，白化数取 C 级白化数区间的中间值，为 0.375.

现场检查时，厂房柱未发现明显位移，吊车运行未出现卡轨现象，证明结构水平位移很小，灰类等级评为 A 级，白化数取 A 级白化数区间的中间值，为 0.875.

依据式(2)及图 2、4，可知上部承重结构对 A 级的聚类系数为 $\sigma_1=0.5\times0.17=0.085$，对 B 级的聚类系数为 $\sigma_2=0.4\times0.33+0.5\times0.33+0.5\times0.17=0.382$，对 C 级的聚类系数为 $\sigma_3=0.6\times0.33+0.5\times0.33+0.5\times0.17=0.448$，对 D 级的聚类系数为 $\sigma_4=0.5\times0.17=0.085$.

该厂房上部承重结构对各灰类等级的聚类向量 $\boldsymbol{\sigma}=(0.085\quad 0.382\quad 0.448\quad 0.085)$，根据最大隶属度原则，其可靠性等级应评为 C 级.

根据《工业建筑可靠性鉴定标准》(GB 50144—2008)，该厂房上部承重结构安全性等级应评为 C 级，使用性等级应评为 C 级，结构可靠性等级评为 C 级. 虽然采用两种方法评级结果一致，但两者含义不同. 采用本文方法评定，充分考虑了构件类型、构件位置在上部承重结构体系承载功能评定中的影响差异，相比《工业建筑可靠性鉴定标准》(GB 50144—2008)，能更加全面地反映结构承载功能状况；对上部承重结构体系可靠性的评定结果以隶属度向量的形式体现，可以较为量化地反映结构体系可靠性状态.

4　结　论

(1)本文采用承载功能、结构整体性、使用状况和结构水平位移作为灰色聚类分析的聚类指标，与《工业建筑可靠性鉴定标准》(GB 50144—2008)从安全性、使用性两方面评定工业厂房上部承重结构可靠性的规定相适应，对现行标准进行了一定的继承与发展，方便工程实际应用.

(2)采用层次分析法，相比《工业建筑可靠性鉴定标准》(GB 50144—2008)，更加充分地考虑了构件类型和构件位置在上部承重结构可靠性评定中的影响差异，对上部承重结构承载功能等级

的评定更加合理,结果更加明确.

(3)采用层次分析法,根据专家意见合理确定各聚类指标在单层工业厂房上部承重结构可靠性评定中的权重,以此替代灰色聚类分析原本的确定聚类权的方法,更符合工程实际.

(4)采用灰色聚类分析与层次分析法相结合对工业厂房进行可靠性评定,最终得到厂房上部承重结构体系可靠性对各等级的隶属度,评定结果相比现行《工业建筑可靠性鉴定标准》(GB 50144—2008)更加量化、明确.

参考文献:

[1] 岳清瑞,幸坤涛,惠云玲. GB 50144《工业建筑可靠性鉴定标准》(报批稿)的修订及主要内容[J]. 工业建筑,2016,**46**(11):152-156,167.
YUE Qingrui, XING Kuntao, HUI Yunling. Revision and its main content for GB 50144 Standard for Reliability Appraisal of Industrial Buildings and Structures(draft for approval)[J]. **Industrial Construction**, 2016, **46**(11): 152-156, 167. (in Chinese)

[2] 杨绿峰,刘 娇,余 波. 结构体系可靠度分析的自适应动态约界法[J]. 土木工程学报,2014,**47**(4):38-46.
YANG Lufeng, LIU Jiao, YU Bo. Adaptive dynamic boundary method for structural system reliability analysis[J]. **China Civil Engineering Journal**, 2014, **47**(4): 38-46. (in Chinese)

[3] 孙 威,黄炎生,杨惠贤. 改进响应面法计算钢筋混凝土框架体系可靠度[J]. 工程力学,2016,**33**(6):194-201,208.
SUN Wei, HUANG Yansheng, YANG Huixian. Reliable response surface methodology for calculating reliability of reinforced concrete frame system[J]. **Engineering Mechanics**, 2016, **33**(6): 194-201, 208. (in Chinese)

[4] 孙长明,綦宝晖,阎 石. 模糊数学在工业厂房可靠性鉴定中的应用[J]. 沈阳建筑工程学院学报(自然科学版),2001,**17**(4):268-271.
SUN Changming, QI Baohui, YAN Shi. Application of fuzzy mathematics for workshop structures reliability assessment[J]. **Journal of Shenyang Architectural and Civil Engineering University (Natural Science)**, 2001, **17**(4): 268-271. (in Chinese)

[5] KALA Z. Fuzzy sensitivity analysis for reliability assessment of building structures[C]// **ICNAAM 2015: 13th International Conference of Numerical Analysis and Applied Mathematics**. Greece: ICNAAM, 2015: 22-28.

[6] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 工业建筑可靠性鉴定标准:GB 50144—2008[S]. 北京:中国计划出版社,2009.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Standard for Appraisal of Reliability of Industrial Buildings and Structures: GB 50144-2008[S]. Beijing: China Planning Press, 2009. (in Chinese)

[7] 陈少杰,顾祥林,张伟平. 层次分析法在既有建筑结构体系可靠性评定中的应用[J]. 结构工程师,2005,**21**(2):31-35.
CHEN Shaojie, GU Xianglin, ZHANG Weiping. The application of AHP method in assessment of existing building structures[J]. **Structural Engineers**, 2005, **21**(2): 31-35. (in Chinese)

[8] 顾祥林,陈少杰,张伟平. 既有建筑结构体系可靠性评估实用方法[J]. 结构工程师,2007,**23**(4):12-17.
GU Xianglin, CHEN Shaojie, ZHANG Weiping. An applicable method to assess the reliability of existing building structures[J]. **Structural Engineers**, 2007, **23**(4): 12-17. (in Chinese)

[9] 同济大学. 既有建筑物结构检测与评定标准:DG/TJ 08-804—2005[S]. 上海:上海市建设和交通委员会,2005.
Tongji University. Standard of Structural Inspection and Assessment for Existing Buildings: DG/TJ 08-804-2005[S]. Shanghai: Shanghai Construction and Transportation Committee, 2005. (in Chinese)

[10] 王 威,韩 阳,赵月平. 灰色聚类分析在建筑结构可靠性评定中的应用[J]. 工业建筑,2006,**36**(S1):235-237.
WANG Wei, HAN Yang, ZHAO Yueping. Application of grey cluster analysis to building structures reliability assessment[J]. **Industrial Construction**, 2006, **36**(S1): 235-237. (in Chinese)

[11] 郭小东,徐 帅,宋晓胜,等. 基于灰色模糊分析法的古建筑木结构安全性评估[J]. 北京工业大学学报,2016,**42**(3):393-398.
GUO Xiaodong, XU Shuai, SONG Xiaosheng, *et al*. Safety evaluation of ancient building wood structure based on grey fuzzy analysis method[J].

Journal of Beijing University of Technology, 2016, **42**(3): 393-398. (in Chinese)

[12] 郭小东，付体彪，徐　帅. 基于灰色白化权函数聚类法的木结构古建筑安全性评估 [J]. 北京工业大学学报，2017，**43**(5)：780-785.
GUO Xiaodong, FU Tibiao, XU Shuai. Safety evaluation of ancient wooden structures based on grey whitening weight function clustering method [J]. **Journal of Beijing University of Technology**, 2017, **43**(5): 780-785. (in Chinese)

[13] 易德生，郭　萍. 灰色理论与方法——提要·题解·程序·应用 [M]. 北京：石油工业出版社，1992：69-127.
YI Desheng, GUO Ping. **Grey Theory and Method—Abstract · Solution · Procedure · Application** [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1992: 69-127. (in Chinese)

[14] SAATY T L. **Decision Making with Dependence and Feedback: the Analytic Network Process** [M]. Pittsburgh: RWS Publications, 2001.

[15] 黄德所，张俊学. 层次分析法中特征向量法确定权重向量的理论 [C] // 1998 中国控制与决策学术年会论文集. 大连：大连海事大学出版社，1998：879-882.
HUANG Desuo, ZHANG Junxue. The method of determining weight vectors by the feature vector method in AHP [C] // **Proceedings of 1998 China Control and Decision Academic Conference**. Dalian: Dalian Maritime University Press, 1998: 879-882. (in Chinese)

Reliability evaluation method for upper load-bearing structural system of single-story industrial building

HE Huanan*[1], DU Yancheng[1], XING Kuntao[2]

(1. State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;
2. China Metallurgical Construction Research Institute Co., Ltd., Beijing 100088, China)

Abstract: In order to evaluate the reliability of the upper load-bearing structure of single-story industrial buildings, a reliability evaluation method combining the analytic hierarchy process (AHP) and grey clustering analysis is proposed. According to the relevant regulations of Standard for Appraisal of Reliability of Industrial Buildings and Structures (GB 50144-2008), it is proposed to adopt the bearing capacity, structural integrity, use status and structural horizontal displacement as the clustering index of grey clustering analysis, and use AHP to determine the weight of the influence on the reliability of the structural system of each index. AHP is used to fully consider the different influences of the location and type of the component on the reliability of the upper load-bearing structure to determine the weight coefficient of the component and evaluate the bearing capacity level of the upper load-bearing structure. According to the grey classification standard of the clustering index and status of buildings and the calculation result of the bearing capacity, the whitening number is assigned to the clustering index. The clustering vector is constructed by clustering analysis, and the reliability level and membership degree of the structural system are determined according to the principle of maximum membership degree. After verification by engineering examples, it is shown that the evaluation results obtained according to the proposed method are consistent with the evaluation results of GB 50144-2008, which can meet the practical application of the project.

Key words: single-story industrial building; upper load-bearing structure; reliability; analytic hierarchy process; grey clustering analysis