

DOI: 10.3969/j.issn.1672-1144.2022.06.027

光伏面板风荷载计算方法的中外规范比较

赵岩¹,王龙威¹,豆红强²

(1. 中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司 浙江 杭州 311122;
2. 福州大学 紫金地质与矿业学院 福建 福州 350116)

摘要: 风荷载作为光伏结构设计的控制荷载,不同国家和地区的荷载规范体系不尽相同。本文选取目前全球应用最为广泛的中、美、欧、日规范开展光伏风荷载计算方法的对比分析,细致对比研究了各规范中风荷载计算的影响因素及其修正系数的异同。研究发现,中、美、欧、日规范中,均有考虑地面粗糙度类别、地形条件、风压高度变化以及风振系数等因素,但各国修正系数取值存在一定差异;对基本风速时距和重现期取值,中、欧、日规范相同,而美国规范中则表现为时距短、重现期长的取值特点。对于光伏支架的风振系数,中、美规范均取固定值,欧盟规范考虑风作用的动力影响则较中、美大。研究结果可为涉外光伏发电工程项目的结构抗风设计提供参考。

关键词: 光伏; 风荷载; 设计规范; 计算方法; 比较研究

中图分类号: TU47

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2022)06-0182-06

Comparative Analysis of Sino – foreign Codes on Wind Load Calculation Methods for Photovoltaic Panels

ZHAO Yan¹, WANG Longwei¹, DOU Hongqiang²

(1. Huadong Engineering Corporation Limited, Power China, Hangzhou, Zhejiang 311122, China;
2. Zijin school of Geology and Mining, Fuzhou University, Fuzhou, Fujian 350116, China)

Abstract: Wind load is the controlling load for PV structure design, the load code system varies in different countries and regions. The most widely used Chinese, American, European and Japanese codes in the world are selected for the comparative analysis of PV wind load calculation methods, and the similarities and differences of wind load calculation factors and their correction coefficients in each code are carefully compared and studied. It is found that the Chinese, American, European and Japanese codes take into account the ground roughness category, topographic conditions, wind pressure height variation and wind vibration coefficient, but there are some differences in the values of correction coefficients among countries; for the basic wind speed time spacing and recurrence period values, the Chinese, European and Japanese codes are the same, while the American code shows the characteristics of short time spacing and long recurrence period values. For the wind vibration coefficient of photovoltaic mounts, both Chinese and American norms take fixed values, while EU norms consider the dynamic effect of wind action more than Chinese and American. The results of the study can provide reference for the structural wind resistance design of PV power generation projects involving foreign countries.

Keywords: photovoltaic; wind load; design codes; calculation method; comparative analysis

当前,全球已有120多个国家或地区提出“碳中和”目标,光伏作为一种新兴的清洁能源,凭借其

度电成本低、能源可获性强、可行性高等优势,已成为为了全球实现“碳中和”目标的关键路径^[1-3]。在

收稿日期: 2022-08-05

修稿日期: 2022-09-07

基金项目: 中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司科技项目(KY2022-ZX-03-04)

作者简介: 赵岩(1986—),男,工程师,主要从事新能源相关的设计与工程管理方面的工作。E-mail: 251083446@qq.com

通信作者: 豆红强(1987—),男,副教授,主要从事岩土与地质工程等方面的教学和研究工作。E-mail: douhq@fzu.edu.cn

这场声势浩大的全球能源革命浪潮中,我国光伏发电工程的建设也逐渐与国际市场接轨。但是,由于不同国家或地区采用的规范体系不尽相同,此时,如何准确认识并理解国内外光伏发电项目的勘察、设计和施工规范的异同就显得愈发重要。如李江渭等^[4]通过对比指出中、美两国规范中光伏支架微型灌注桩设计存在明显的差异;刘燕华等^[5]亦对比分析了中、澳、美、英光伏并网标准中电能质量相关规范的差异。

风荷载作为光伏结构设计的控制荷载,其表现出显著的方向不确定性、脉动性以及不均匀性^[6-7]。为深化风荷载及其效应的认识,提高结构抗风设计水平,国内研究人员已就国内外风荷载设计规范开展了细致的对比研究。夏瑞光和范存新^[8]对比研究了中、澳、欧风荷载规范中影响平均风荷载和脉动风荷载的主要参数;李先顺和柳景虹^[9]则系统比较了中、美、欧规范中风荷载的计算方法;孙凌志等^[10]从风荷载体型相关系数的角度对粤港澳地区风荷载规范进行了细致的对比分析;徐欣和周国玲^[11]比较分析了中欧规范中桥梁结构工程风荷载的计算方法。显然,上述比较分析对设计人员理解和应用不同国家或地区的风荷载计算提供了重要参考,但具体到光伏发电工程,目前仍缺乏针对性的风荷载设计规范对比研究。

鉴于此,以光伏面板风荷载计算方法为切入点,选择目前全球应用最为广泛的中、美、欧、日规范开展比较分析研究,以期深入了解不同规范风荷载计算方法的异同,为涉外光伏发电工程项目的结构抗风设计提供参考。

1 风荷载计算方法的对比

当前在对光伏板支架和支座结构进行抗风设计时,太阳能光伏面板风荷载的计算大都是参考建筑设计规范,图1即为光伏面板风荷载计算示意图。具体来说,我国采用的风荷载计算方法是基于《建筑结构荷载规范》^[12](GB 50009—2012)和《光伏电站设计规范》^[13](GB 50797—2012),美国则是采用的《ASCE-7-10 建筑荷载规范》^[14],日本采用的是《太阳能光伏发电系统设计与施工》^[15],而欧盟采用的是《EN 1991-1-4:2005》^[16]。

1.1 中国规范的风荷载计算方法

我国在《建筑结构荷载规范》^[12](GB 50009—2012)中规定作用于太阳能光伏面板上的风荷载可按式(1)计算:

$$w_k = \beta_s \mu_s \mu_z w_0 \quad (1)$$

式中: w_0 为基本风压 kN/m^2 ; μ_s 为风荷载体型系数; μ_z 为风压高度变化系数; β_s 为风振系数。其中 μ_s 一般按该规范 8.3.3 中第三条规定取值,即表 8.3.1-29 中单坡及双坡顶盖取值的 1.25 倍。但有必要指出的是,表 8.3.1-29 中的坡度区间为 $0^\circ \sim 30^\circ$,但太阳能跟踪器度数变化范围却并不完全与此重合,因此,部分取值可通过线性插值确定。此外,太阳能光伏阵列安装高度也不及屋顶高度,所以该规范并不能完全适用太阳能光伏面板体型系数的计算。而在《光伏电站设计规范》^[13](GB 50797—2012)中虽统一了地面与楼顶光伏支架体型系数的取值(均为 1.3),但又使得地面光伏支架的取值过于保守,在一定程度上会造成材料的浪费,进而导致工程总成本的增加。

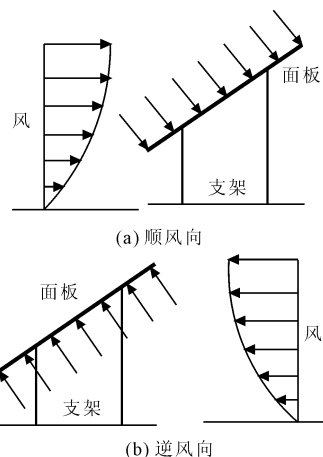


图1 光伏面板风荷载示意图

1.2 日本规范的风荷载计算方法

日本《太阳能光伏发电系统设计与施工》^[15]规定的风荷载计算方法见式(2):

$$w = C_w q A_w \quad (2)$$

式中: C_w 为风力系数; q 为设计速度压力 kN/m^2 ; A_w 为受风面积 m^2 。

设计速度压力 q 由式(3)予以计算确定:

$$q = 0.6 V_0^2 E_f G_f I \quad (3)$$

式中: V_0 为风速 m/s ; G_f 为阵风影响系数; I 为用途系数; E_f 为高度方向上的平均风速分布。

需指出的是,风力系数 C_w 可根据面板上各点风压系数加权平均予以确定。对地面上独立安装的光伏支架而言,其风力系数可表示为:

$$\begin{cases} \text{正压: } C_w = 0.65 + 0.009\theta \\ \text{负压: } C_w = 0.71 + 0.016\theta \end{cases} \quad (4)$$

式中: θ 为太阳能面板仰角 ($15^\circ \leq \theta \leq 45^\circ$)。

相较于我国光伏发电设计规范,日本规范较细

致地考虑了用途系数,这使得日本的光伏发电面板风荷载设计值更加符合实际使用情况;其次,日本的太阳能面板仰角一般为 15°~45°。总体上,我国固定光伏支架设计的参考依据主要源自日本规范所提供的经验公式。

1.3 美国规范的风荷载计算方法

美国太阳能光伏面板的风荷载的计算公式主要根据美国建筑结构荷载规范(ASCE-7-10)^[14]中实施,如(5)所示:

$$p = q_h G C_N \quad (5)$$

式中: G 为阵风系数; C_N 为风荷载体型系数; q_h 为某一高度处的速度风压 kN/m^2 。

可见,美国 ASCE-7-10 规范在计算光伏面板风荷载时采用阵风为基本风速,而非我国规范采用的平均风速。但两种规范采用了相同的计算设计原理,对于常规结构的风荷载计算结果相差不大。

1.4 欧盟规范的风荷载计算方法

欧盟规范《EN 1991-1-4: 2005》^[16]提供了两种适用于光伏面板风荷载计算模型,一是力系数法,见式(6);二是求和法,见式(7)。

$$F_w = c_s c_d \cdot c_f \cdot q_p(z_e) \cdot A_{ref} \quad (6)$$

$$\vec{F}_w = \vec{F}_{w_e} + \vec{F}_{w_i} + \vec{F}_{fr} \quad (7)$$

其中:

$$F_{w_e} = c_s c_d \cdot \sum_{surfaces} q_p(z_e) \cdot c_{pe} \cdot A_{ref} \quad (8)$$

$$F_{w_i} = \sum_{surfaces} q_p(z_i) \cdot c_{pi} \cdot A_{ref} \quad (9)$$

$$F_{fr} = c_{fr} \cdot q_p(z_e) \cdot A_{fr} \quad (10)$$

式中: $c_s c_d$ 为结构系数; c_f 为结构整体力学系数; c_{pe} 为外压系数; c_{pi} 为内压系数; c_{fr} 为摩擦系数; A_{ref} 为结构参考面积 m^2 ; A_{fr} 则为与风向平行的结构外表面面积 m^2 。

综上,通过对比中、美、日以及欧盟规范中有关太阳能光伏面板风荷载计算方法可知,各国采用风荷载的计算原理大体一致,均是在基本风速的基础上(此处的风速并不是人为直接估算的风速,而是根据相关参数计算出的风速)计算基本风压,再综合考虑结构动力响应、风力扰动、地形条件和地表粗糙度等因素予以赋值修正,但是需指出的是,各国规范对于修正系数取值大小并不相同,下文即对此开展系统对比研究。

2 风荷载修正系数的对比分析

2.1 地表类别与基本风速

基本风速作为影响风荷载计算的最主要因素,其值受地面粗糙度、标准高度、时距和重现期等因素

影响。

就地面粗糙度而言,我国规范将地面粗糙度分为 A—D 四类,如表 1 所示,其中场地的风压高度变化系数可由地面粗糙度类别予以确定。

表 1 我国规范中地面粗糙类别表

地貌类别	地面粗糙状况
A	近海海面和海岛、海岸、湖岸及沙漠地区
B	田野、乡村、丛林、丘陵以及房屋比较稀疏的乡镇
C	有密集建筑群的城市市区
D	有密集建筑群且房屋较高的城市市区

美国规范中关于速度压力暴露系数 k_z 的计算也是由地面粗糙程度决定。与我国规范相似,美国规范同样将场地地貌划分为四类(见表 2)。

表 2 美国规范中地面粗糙类别表

地貌类别	地面粗糙状况
A	50% 以上的房屋高度超过 70 英尺的大城市市区
B	城市及市郊地区、树林地区或其他具有障碍物(如独户住宅且相对集中)的地区
C	具有高度小于 30 英尺的障碍物的开阔地区。该类地区包括平坦、开阔的乡村及草原
D	平原、无障碍的海岸地区

日本光伏发电规范中环境系数 J 是与太阳能光伏阵列的安装场所的地形密切相关,其将光伏阵列安装场所划分为三类,如表 3 所示。

表 3 日本规范中的环境系数表

地貌类别	建设地点的周围地形等状况
A	如海面一样基本没有障碍物的平坦地域
B	树木、低层房屋(楼房)分布的平坦的地域
C	树木、低层房屋(楼房)密集分布的平坦的地域或中层建筑物(4~9 层)分布的地域

而在欧盟规范中,则将地面粗糙度分为 0—IV 五类,如表 4 所示。

表 4 欧盟地面粗糙类别表

地貌类别	地面粗糙状况
0 类	海面或接近开阔海面的近海地区
I 类	湖面或无障碍物、可忽略植被的平整地区
II 类	有矮小植被(如草地),或有独立障碍物(如树、建筑物),且障碍物之间的距离不小于障碍物 20 倍高度的地区
III 类	间距小于 20 倍高度的规则植被、建筑物或障碍物的地区
IV 类	平均高度超过 15 m 的建筑物覆盖区不少于 15% 的场地面积

综上, 现归纳有中、美、日、欧规范中的地面粗糙度类别, 如表 5 所示可直观对照。

表 5 地面粗糙度类别对照表

中国	美国	欧盟	日本
A	D	0, I	A
B	C	II	B
C	B	III	C
D	B	IV	C

同时, 表 6 又系统总结了各国规范中测定基本风速的粗糙度类别。由表 6 可知, 中、美、日、欧规范中的基本风速均是在地面粗糙类别为“平坦开阔”处测定的。

表 6 基本风速地面粗糙度类别

国别	地面粗糙类别
中国	B 类(平坦开阔)
美国	C 类(平坦开阔)
日本	C 类(平坦开阔)
欧盟	II 类(平坦开阔)

就标准高度而言, 标准高度的取值对基本风速具有显著的影响, 整体表现为风速距地愈近, 风速愈小, 距地愈高, 风速愈大。表 7 系统的总结了中、美、欧、日规范中基本风速标准高度的取值。从表 7 中可以看出, 其基本风速均在高度为 10 m 处测得。若某项目中的标准高度不是 10 m, 则可以根据规范采用相应的公式予以换算。

表 7 基本风速高度对比表

国别	标准高度/m
中国	10
日本	10
美国	10
欧盟	10

基本风速是规定时距内的平均风速, 因此时距作为基本风速的时间间隔, 其取值大小不可避免的影响着风速的大小。一般而言, 时距与风速呈负相关, 时距取值越小, 基本风速也就越大。而各国对于时距的取值各有不同, 为此, 表 8 给出了中、美、欧、日规范中基本风速的时距取值。较为明显的, 表中, 中、欧、日规范中基本风速时距取值均为 600 s, 而美国规范中仅为 3 s。

最后, 表 9 给出了中、美、欧、日规范中基本风速的重现期。由表可知, 中、欧、日规范中基本风速的

重现期取值均为 50 a, 而美国规范中的取值则包含 3 个重现期, 这是由于美国荷载规范 ASCE7-10 规定, 建(构)筑物的风险类别可划分为 4 个类别, 对应采用的基本风速重现期并不完全相同。具体来讲, I 类次要建(构)筑的基本风速重现期取 300 a, II 类一般建(构)筑物的基本风速重现期取 700 a, III、IV 类重要建(构)筑物的基本风速重现期则取 1 700 a。

表 8 基本风速时距对比表

国别	时距/s
中国	600
日本	600
欧盟	600
美国	3

表 9 基本风速重现期对比表

国别	重现期/a
中国	50
欧盟	50
日本	50
美国	300, 700, 1700

2.2 风压高度与地形修正系数

在光伏面板风荷载计算中, 不同地面粗糙度类别下风速随高度的变化均在中、美、欧、日规范予以充分考虑。所不同的是, 我国规范中的风压高度变化系数和美国规范中的暴露系数均是对基本风压修正的, 而欧盟规范中的粗糙度系数则是对基本风速予以修正。图 2 为平坦开阔地区的我国规范(μ_z)、美国规范(k_z)以及欧盟规范 $c_r^2(z)$ 随距地面高度的变化规律。由图可知, 美国规范中的暴露系数 k_z 最小, 欧盟规范中粗糙度系数 $c_r^2(z)$ 最大, 而我国规范中的风压高度变化系数 μ_z 与欧盟规范较为接近。

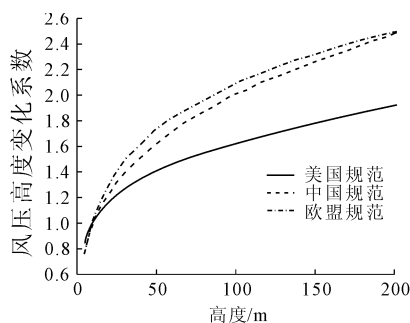


图 2 中、美、欧规范中风压高度变化系数比较
在风荷载的计算过程中, 对于建设于山坡和山

峰等特殊地形的太阳能光伏电站,需充分考虑地形条件的影响,并纳入计算考虑范围。

我国规范给出了地形修正系数 η_B , 计算如下:

$$\eta_B = \left[1 + \kappa \tan \alpha \left(1 - \frac{z}{2.5H} \right) \right]^2 \quad (11)$$

式中: α 为山坡坡度, ($^\circ$); H 为坡高, m; z 为建(构)筑物离地坪的高度, m; κ 对山峰地形取 2.2, 对山坡地形则取 1.4。

与此同时, 美国规范中给出的地形修正系数 k_{zt} 计算公式为:

$$\begin{cases} k_{zt} = (1 + k_1 k_2 k_3)^2 \\ k_2 = 1 - \frac{|x|}{\mu L_h} \\ k_3 = e^{-\gamma z / L_h} \end{cases} \quad (12)$$

式中: k_1 为待定参数; μ 、 γ 分别为水平、竖向衰减系数; L_h 为山坡半高处离坡顶的水平距离, m; $|x|$ 为离坡顶的水平距离, m。

欧盟规范中的地形修正系数 c_0 可由式(13)予以确定。

$$\begin{cases} c_0 = 1 & \phi < 0.05 \\ c_0 = 1 + 2s\phi & 0.05 < \phi < 0.3 \\ c_0 = 1 + 0.6s & \phi > 0.3 \end{cases} \quad (13)$$

表 10 风振系数对比表

国别	固定取值	计算公式
美国	基本自振周期不大于 1 s 且高宽比不大于 4 的房屋 $G = 0.85$	$G = 0.925 \left(\frac{1 + 1.7g_z I_z Q}{1 + 1.7g_s I_z} \right)$ 式中: I_z 为高度 z 处的湍流强度; g_z 为背景反应峰值系数; g_s 为风振峰值系数; Q 为背景反应系数。
欧盟	高度小于 15 m 的结构; $c_s c_d = 1.0$, $1 + 7I_v(z_s) > 1.0$ 。	$c_s c_d [1 + 7I_v(z_s)] = 1 + 2k_p I_v(z_s) \sqrt{B^2 + R^2}$ 式中: I_v 为湍流强度; k_p 为峰值系数; R^2 为风振反应系数; B^2 为背景反应系数。
中国	高度不大于 30 m, 且高宽比不大于 1.5。	$\beta_z = 1 + 2g I_{10} B_z \sqrt{1 + R^2}$ 式中: I_{10} 为高度 10 m 处的名义湍流强度; g 为峰值因子; R 为共振分量因子; B_z 为背景分量因子。

由表 10 可知, 在选取刚度较大的低矮建(构)筑物的风振系数(阵风系数)时, 中、美两国规范都是取固定值。而在欧盟规范中, 仅结构形状系数为固定值, 对于考虑风作用脉动影响的湍流强度的取值则大于 1.0。可见, 对于低矮建(构)筑物等结构(如太阳能光伏支架)而言, 欧盟规范考虑风作用的动力影响明显比中、美规范大。

3 结 论

(1) 中、美、欧、日规范中有关太阳能光伏面板

式中: s 为地形位置系数; ϕ 为山坡的坡度, ($^\circ$)。

如前所述, 基本风速的测量需在平坦开阔场地开展, 而对建于山坡和山峰等特殊地形上的太阳能光伏电站, 在风荷载计算时各国规范中均有将受地形条件影响的放大系数(即地形修正系数)纳入考虑范畴, 并且主要通过考虑山坡坡度及建筑物位于山坡的位置确定地形修正系数的取值大小。

2.3 风振系数

事实上, 由于太阳能光伏支架结构高度不大, 其风振系数可近似取定值。但有必要指出的是, 相较于一般低矮建筑物, 光伏支架结构常表现出柔度大且脆性破坏的特征。因此, 在太阳能光伏面板风荷载计算模型中应对风振系数予以充分考虑。

风脉动和结构的风振效应为我国规范中的风振系数 β_z 取值的主要考虑对象, 用以描述风作用的动力影响; 而美国规范则采用阵风系数 G 考虑动力影响; 欧盟规范则分别采用湍流强度 I_v 来考虑风的脉动, 用结构形状系数 $c_s c_d$ 考虑结构的风振效应, 即是说, 欧盟规范中湍流强度和结构形状系数的乘积 $c_s c_d [1 + 7I_v(z_s)]$ 与美国规范中的风振系数 β_z 及美国规范中的阵风系数 G 相似。表 10 即为上述各国系数对风荷载动力影响的对比。

风荷载计算原理大体一致并自成体系, 即在基本风压的基础上综合考虑地面粗糙度类别、地形条件、风压高度变化以及风振系数等因素进行修正, 但各国修正系数取值存在一定差异。

(2) 中、美、欧、日规范中地面粗糙度类别、标准高度取值基本相同; 中、欧、日规范中基本风速时距和重现期取值也相同, 美国规范中则表现为时距短、重现期长的取值特点。

(3) 就光伏支架的风振系数而言, 中、美规范均取固定值, 欧盟规范考虑风作用的动力影响则较中、

美大。

(4) 各国或地区规范在计算光伏面板风荷载时均未考虑阵列太阳能光伏板之间的相互影响。因此,对于复杂大型光伏电站项目,有必要借助三维数值模拟确定光伏阵列风荷载。

参考文献:

- [1] 王捷,林余杰,吴成坚,等. 碳中和背景下太阳能光伏产业现状及发展[J]. 储能科学与技术, 2022, 11(2): 731-732.
- [2] 金秋实,王 晓,倪依琳,等. “双碳”背景下光伏行业发展研究与展望[J]. 环境保护, 2022, 50(Z1): 44-50.
- [3] 李美成,高中亮,王龙泽,等. “双碳”目标下我国太阳能利用技术的发展现状与展望[J]. 太阳能, 2021(11): 13-18.
- [4] 李江渭,何铠岐,甘子牛,等. 光伏支架微型灌注桩基础采用中美规范设计对比分析[J]. 电力勘测设计, 2021(S2): 45-49.
- [5] 刘燕华,张 楠,赵冬梅. 国内外光伏并网标准中电能质量相关规范对比与分析[J]. 现代电力, 2011, 28(6): 77-81.
- [6] 马文勇,柴晓兵,马成成. 柔性支撑光伏组件风荷载影响因素试验研究[J]. 太阳能学报, 2021, 42(11): 10-18.
- [7] Shademan M, Barron R M, Balachandar R, et al. Numerical simulation of wind loading on ground-mounted solar panels at different flow configurations [J]. Canadian Journal of Civil Engineering, 2014, 41(8): 728-738.
- [8] 夏瑞光,范存新. 中澳欧风荷载规范的对比研究[J]. 苏州科技学院学报(工程技术版), 2012, 25(3): 13-18, 49.
- [9] 李先顺,柳景虹. 中、美、欧标准中风荷载计算对比研究[J]. 钢结构, 2017, 32(7): 87-91.
- [10] 孙凌志,仇建磊,马 扬,等. 粤港澳规范建筑风荷载体型相关系数对比分析[J]. 广东土木与建筑, 2021, 28(5): 16-21.
- [11] 徐 欣,周国玲. 中欧规范桥梁结构风荷载计算方法对比研究[J]. 中外公路, 2019, 39(5): 132-135.
- [12] 建筑结构荷载规范: GB 50009—2012 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
- [13] 光伏电站设计规范: GB 50797—2012 [S]. 北京: 国家市场监督管理总局, 2012.
- [14] Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures: ASCE 7-10 [S]. Reston: American Society of Civil Engineering, 2005.
- [15] 太阳光发电协会(日). 太阳能光伏发电系统的设计与施工 [M]. 刘树民,宏伟,译. 北京: 科学出版社, 2006.
- [16] Eurocode 1: Actions on Structures—Part 1-4: General Actions—Wind Actions [S]. Brussels: European Committee for Standardization, 2003.

(上接第154页)

- [11] Tavares V, Gregory J, Kirchain R, et al. What is the potential for prefabricated buildings to decrease costs and contribute to meeting EU environmental targets? [J]. Building and Environment, 2021, 206: 108382.
- [12] 苏俊霞,郑 静,安孟康,等. 拼装式锚杆(索)框架结构力学特征数值模拟与试验研究[J]. 铁道建筑, 2017, 57(10): 101-104.
- [13] 郑 静,安孟康,苏俊霞,等. 拼装式锚杆(索)框架现场试验研究[J]. 铁道建筑, 2020, 60(7): 93-98.
- [14] 杨校辉,郭 楠,张卫雄,等. 一种节点连接部件以及框架预应力锚索支护结构: ZL 201920917783. 8 [P]. 2020-5-19.
- [15] 杨校辉,郭 楠,等. 一种基于型钢连接的预制构件以及装配式框架支护结构: ZL 201921087299. 3 [P]. 2020-4-14.
- [16] 混凝土强度检验评定标准: GB/T 50107—2010 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
- [17] 钢结构焊接规范: GB 50661—2011 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
- [18] 钢结构工程施工质量验收规范: GB 50205—2001 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2001.