

钢筋混凝土吊车梁承载能力设计可靠度研究

姚继涛¹, 谷慧^{2†}, 李全旺², 黄斌¹

(1. 西安建筑科技大学 土木工程学院, 陕西 西安, 710055; 2. 清华大学 土木工程系, 北京, 100084)

摘要:钢筋混凝土吊车梁承载能力设计, 因缺乏吊车荷载及组合效应的概率模型, 荷载分项系数由工程经验确定, 设计可靠度控制水平未知. 针对吊车梁正截面抗弯、斜截面抗剪承载能力设计方法, 引入吊车荷载概率模型和统计结果, 将基本参量无量纲化, 进行设计可靠指标校核. 吊车梁单向、双向抗弯设计可靠指标分别为 5.79 和 5.87, 斜截面抗剪设计可靠指标为 5.31. 钢筋混凝土吊车梁承载能力设计可靠指标偏高, 设计偏保守. 定量分析各参量对吊车梁可靠度的影响, 为设计及维护提出合理建议.

关键词: 吊车梁; 承载能力设计; 可靠度校核; 设计及维护建议

中图分类号: TU318.1

文献标志码: A

Research on Bearing Capacity Design Reliability of RC Crane Beams

YAO Jitao¹, GU Hui^{2†}, LI Quangwang², HUANG Bin¹

(1. School of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China;

2. Department of Civil Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: For the bearing capacity design of RC crane beams, the crane load action partial coefficients are determined by engineering experience for lacking the probability models of the crane load and combination actions. So the design reliability level of the beams is unknown. For the bending and shearing capacity design method of the RC crane beams, the probability model and the statistical results of crane load were introduced, and the design reliability indicators were calibrated with the basic variables non-dimension. The design reliability indicators were 5.79 and 5.87 respectively for the one and two-way bending design, and 5.31 for the oblique section shear design. The reliability index was high and conservative for the bearing capacity design of the crane beams. It quantitatively analyzed the different influence of each factors on the reliability of the crane beams, and gave some reasonable suggestions for the design and maintenance.

Key words: crane beam; bearing capacity design; reliability calibration; design and maintenance suggestion

* 收稿日期: 2018-10-13

基金项目: “十三五”国家重点研发计划专项资助项目(2016YFC 0701301-01), National Key R&D Program of China(2016YFC 0701301-01)

作者简介: 姚继涛(1965—), 男, 陕西白水人, 西安建筑科技大学教授, 博士

† 通讯联系人, E-mail: guhuiyatou@163.com

吊车梁作为工业厂房中直接承受吊车荷载的重要构件,其承载能力设计备受重视,与一般受弯构件相比,吊车梁最大的特点是承受移动的吊车荷载,设计时按两端支撑在排架柱上的简支梁计算. 吊车梁承载能力设计,包括正截面抗弯承载能力设计和斜截面抗剪承载能力设计,均采用以概率理论为基础,以分项系数设计表达式表达的承载能力极限状态设计方法^[1],其中荷载组合效应设计值,采用永久荷载与吊车荷载的基本组合,荷载分项系数(指永久荷载和吊车荷载的分项系数),由《建筑结构荷载规范》(GB 50009—2012)^[2]规定. 然而此处分项系数确定时,因当时缺乏吊车荷载及多台吊车荷载组合效应的概率模型及统计资料,规范编制组仅由工程经验确定,并未对其进行可靠度分析^[3],故按现行规范设计的吊车梁可靠度控制水平仍未知^[4]. 考虑到吊车荷载及荷载效应概率模型^[5]建立后,对单个荷载及多台吊车荷载组合效应的标准值取值的概率校核结果显示均具有大于99%的保证率,且吊车荷载的变异性相比永久荷载(标准值具有50%保证率)变异性大得多,这意味着吊车梁承载能力设计的可靠指标在理论上相当保守,应远大于当前考虑一般活荷载校核结果确定的目标可靠指标(对安全等级为二级的工程结构,延性破坏为3.2,脆性破坏为3.7).

本文针对目前规范中采用的吊车梁承载能力设计方法,确定抗力的设计表达式,基于工业厂房吊车荷载及多台吊车荷载组合效应的概率模型和统计结果,确定荷载效应的概率模型,考虑吊车梁图中常用规格吊车及吊车梁尺寸,采用基本参量无量纲化的方法,在参量常用经验取值范围内,校核非疲劳设计控制的钢筋混凝土吊车梁设计可靠指标,揭示采用承载能力极限状态设计方法设计的吊车梁可靠度控制水平,并定量分析各参量对吊车梁可靠度的影响,为设计及后期维护提出合理建议.

1 规范中的吊车梁承载能力设计方法

工业厂房中的吊车梁是在弯矩、剪力、扭矩共同作用下的复合受力构件,设计时考虑其承受恒载和多台吊车荷载的共同作用,其中恒载包括吊车梁自重、轨道联结以及垫层重,作用于吊车梁横截面弯曲中心处,吊车荷载包括竖向荷载和水平荷载,采用影响线法计算吊车梁在移动荷载(吊车荷载)作用下控

制截面的最大内力. 吊车梁的尺寸及配筋设计考虑弯矩和剪力的作用,扭矩作用一般通过构造保证,文中校核仅针对吊车梁正截面抗弯承载能力、斜截面抗剪承载能力的设计.

1.1 基于概率的极限状态设计方法

钢筋混凝土吊车梁采用基于概率的极限状态设计方法,以极限状态作为判定结构可靠与否的物理标准,以可靠指标度量结构的可靠性,以基本变量的代表值和分项系数建立设计表达式,即国际标准《结构可靠度总原则》(ISO 2394—2015)^[6]、欧洲规范《结构设计基础》(EN 1990:2002)^[7]和我国《工程结构可靠性设计统一标准》(GB 50153—2008)^[11]中规定的以概率理论为基础的承载能力极限状态设计方法. 以内力形式表达的吊车梁设计表达式^[8]为:

$$\gamma_0 S \leq R(f_c, f_s, a_k, L) / \gamma_{Rd} \quad (1)$$

式中: γ_0 为结构重要性系数; S 为承载能力极限状态下作用组合的效应设计值; $R(\cdot)$ 为结构构件的抗力函数; f_c, f_s 为混凝土、钢筋的强度设计值; a_k 为几何参数的标准值; γ_{Rd} 为结构构件抗力模型不定性系数.

不同结构构件,承载能力极限状态下作用组合的效应设计值,因选取的荷载组合类型的不同而不同.《机械工业厂房结构设计规范》(GB 50906—2013)^[9]规定:在计算吊车梁的强度和稳定性时,采用由可变荷载(吊车荷载)控制的荷载效应基本组合,按作用在跨间内荷载效应最大的两台吊车确定,基本组合按《建筑结构荷载规范》(GB 50009—2012)的规定取值.吊车梁承载能力设计的极限状态设计表达式为:

$$\gamma_0 (\gamma_G S_{G_i} + \gamma_Q \gamma_{L_i} \gamma_{Q_i} + \sum_{i=2}^n \gamma_Q \gamma_{L_i} \psi_{ci} S_{Q_i}) \leq R(f_c, f_s, a_k, L) / \gamma_{Rd} \quad (2)$$

式中: γ_G 为永久荷载分项系数; γ_Q, γ_{Q_i} 分别为主导可变荷载和第*i*个可变荷载的分项系数; $\gamma_{L_i}, \gamma_{L_i}$ 为主导可变荷载和第*i*个可变荷载考虑设计使用年限的调整系数; S_{G_i} 为永久荷载标准值的效应; S_{Q_i} 为在基本组合中起控制作用的一个可变荷载标准值的效应; S_{Q_i} 为第*i*个可变荷载标准值的效应; ψ_{ci} 为第*i*个可变荷载的组合值系数,其他参量含义同公式(1).采用式(2)设计的构件,其抗力标准值一般可表达为:

$$R_k = \gamma_{Rd} \gamma_0 (\gamma_G S_{G_i} + \gamma_Q \gamma_{L_i} \gamma_{Q_i} + \sum_{i=2}^n \gamma_Q \gamma_{L_i} \psi_{ci} S_{Q_i}) \quad (3)$$

1.2 抗力标准值的理论表达式

《钢筋混凝土吊车梁设计规程》(YS 06—78)^[10]

规定:对吊车梁正截面抗弯设计,根据实际受力情况按单向抗弯或双向抗弯设计考虑,一般可简化为单向抗弯设计.双向抗弯设计时,将综合弯矩设计值取为 $M = \sqrt{M_x^2 + M_y^2}$, 式中 M_x 是由吊车竖向荷载和梁自重产生的弯矩设计值, M_y 是由吊车横向水平荷载产生的弯矩设计值(文中均为厂房内吊车梁,不考虑露天栈桥,即此处的横向水平荷载不包括风荷载),当前规范基本沿用此规定,但一般仅做单项抗弯考虑^[2,8].对吊车梁斜截面抗剪设计,因实际工程中由吊车竖向荷载引起的吊车梁剪力值,远大于由横向水平荷载引起的同一截面另一方向上的剪力值,故仅考虑吊车竖向荷载,即可满足另一方向上的设计要求,而对吊车横向水平荷载产生的水平剪力,仅用于吊车扭转及梁与柱的连接计算^[8,10-11].设计中因吊车荷载是核定的^[2],不考虑其值随设计使用年限的调整,取式(3)中 $\gamma_{L1} = 1.0$.吊车梁正截面抗弯、斜截面抗剪承载能力极限状态设计表达式分别为:

$$\gamma_0[\gamma_G S_G + \gamma_Q (\mu S_{DS} + S_{DH})] \leq R(f_c, f_s, a_k, L) / \gamma_{Rd} \quad (4)$$

$$\gamma_0(\gamma_G S_G + \gamma_Q \mu S_{DS}) \leq R(f_c, f_s, a_k, L) / \gamma_{Rd} \quad (5)$$

式中: S_{DS} 、 S_{DH} 分别为吊车竖向荷载、横向水平荷载组合效应标准值^[9]; γ_0 为吊车荷载分项系数; μ 为吊车竖向荷载动力系数,对 A1~A5 的软钩吊车取 1.05,对 A6~A8 的软钩吊车和硬钩吊车取 1.1^[2],一般在吊车梁的承载能力计算和疲劳验算中考虑,本质是将动态作用转化为拟静态作用而引入的等效动力放大系数,以便参与其他荷载的组合.校核考虑设计使用年限为 50 年的一般工业厂房,取 $\gamma_0 = 1.0$;按照《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2015)的规定,取抗力模型不定性系数 γ_{Rd} 为静力设计时的 1.0;按照《建筑结构可靠性设计统一标准》(GB 50068—2018)^[4]的规定,正截面抗弯承载能力和斜截面抗剪承载能力设计时,荷载效应对承载力不利时,取永久荷载分项系数 $\gamma_G = 1.3$,吊车荷载分项系数 $\gamma_Q = 1.5$.由此得抗力标准值表达式为:

$$\text{双向抗弯} \\ R_k = \gamma_{Rd} \gamma_0 [(1.3 S_G + 1.5 \mu S_{DS})^2 + (1.5 S_{DH})^2]^{1/2} \quad (6)$$

$$\text{单向抗弯} \\ R_k = \gamma_{Rd} \gamma_0 (1.3 S_G + 1.5 \mu S_{DS}) \quad (7)$$

$$\text{抗剪设计} \\ R_k = \gamma_{Rd} \gamma_0 (1.3 S_G + 1.5 \mu S_{DS}) \quad (8)$$

2 吊车梁设计可靠指标校核方法

对基本组合对应的承载能力极限状态设计方法,根据式(2)确定设计使用年限 T 内的功能函数

$$Z = R - S_G - S_{Q(T)} - \sum_{j=1}^{i-1} S_{Q_j(\tau_j)} - \sum_{j=i+1}^n S_{Q_j(\tau_j)} \quad (9)$$

式中: S_X 代表作用 X 产生的效应,均为随机变量, G 、 Q 分别代表永久作用和可变作用.

按下列步骤校核其实际的可靠度控制水平:

1)任意选取永久作用标准值产生的效应 S_G ,通常可取 $S_G = 1$.

2)根据工程实际,确定 $\rho_{Si} = S_{Qi} / S_G$ 、 $\rho_{Sj} = S_{Qj} / S_G$ ($j \neq i$) 的取值范围,它们的宽度一般较小.

3)选取一组 ρ_{Si} 、 ρ_{Sj} ($j \neq i$) 的值,确定抗力标准值.

4)根据统计资料,确定各基本变量均值系数和变异系数 R_k .

5)根据各作用的均值系数和变异系数,按 $S_G = 1$ 、 $S_{Qi} = \rho_{Si}$ 、 $S_{Qj} = \rho_{Sj}$ ($j \neq i$),确定永久作用 G 和可变作用 Q_1, Q_2, \dots, Q_n 各自在设计基准期 T_0 内最大值 $Q_1(T_0), Q_2(T_0), \dots, Q_n(T_0)$ 所产生效应的分布参数,并进一步确定主导可变作用 Q_i 在设计使用年限 T 内最大值 $Q_i(T)$ 所产生效应的分布参数,可变作用 Q_j 任意时点值 $Q_j(\tau_j)$ ($j \neq i$) 或上一作用时段内最大值 $Q_j(\tau_{j-1})$ ($j > 1$) 所产生效应的分布参数.

6)根据抗力标准值 R_k 和抗力的均值系数、变异系数,确定抗力 R 的分布参数.

7)按式(9)的功能函数,计算结构在设计使用年限 T 内的可靠指标 β .

8)选取 ρ_{Si} 、 ρ_{Sj} ($j \neq i$) 的其他数值,重复第(3)~第(6)步,直至确定 ρ_{Si} 、 ρ_{Sj} ($j \neq i$) 取值范围内结构的可靠指标,综合反映各种可能情况下,式(2)所示结构设计方法的可靠度控制水平.

按上述步骤进行吊车梁承载能力设计的可靠度校核时,考虑永久荷载作用效应和两台吊车荷载组合效应,按双向抗弯设计时,需同时考虑吊车竖向荷载和横向水平荷载,按单向抗弯设计和抗剪设计时,仅考虑竖向荷载.其功能函数分别为:

$$\text{双向抗弯设计} \\ Z = R - S_G - S_{DS} - S_{DH} \quad (10)$$

$$\text{单向抗弯设计} \\ Z = R - S_G - S_{DS} \quad (11)$$

抗剪设计

$$Z = R - S_G - S_{DS} \quad (12)$$

式中: R 为按规范设计的吊车梁抗力; S_G 、 S_{DS} 、 S_{DH} 分别为永久作用、两台吊车竖向荷载组合作用、横向水平荷载组合作用的作用效应(控制截面处的弯矩值或剪力值)。

国际标准《结构可靠度总原则》(ISO 2394: 2015)建议,抗力概率模型为正态分布和对数正态分布,我国《工程结构可靠性设计统一标准》(GB 50153—2008),考虑构件抗力非负的特点,选取对数正态分布作为抗力的分布函数。《建筑设计统一标准》(GBJ 68—84)^[12]在全国范围内对材料性能和几何参数做了相应调查,对构件的承载能力做了大量的实验研究和统计分析,经计算确定了钢筋混凝土构件不同破坏类型的抗力均值系数和变异系数,受弯构件, $k_R = 1.13$, $\delta_R = 0.10$;受剪构件, $k_R = 1.24$, $\delta_R = 0.19$ 。袁健等^[13]通过收集和整理国内外近几年来钢筋混凝土矩形截面简支梁抗剪研究的相关实验,更新受剪破坏的统计参数为: $k_R = 1.84$; $\delta_R = 0.265$;各实验的差异性较大。抗力均值由均值系数和标准值的乘积计算: $\mu_R = k_R \cdot R_k$ 。《工程结构可靠性设计统一标准》(GB 50153—2008)建议,永久荷载效应与永久荷载呈线性关系,概率模型取正态分布,均值系数和变异系数为: $k_G = \mu_G/S_G = 1.06$, $\delta_G = 0.07$;吊车竖向荷载组合效应 S_{DS} 、横向水平荷载组合效应 S_{DH} 的概率模型和统计参数的计算见2.2节。可靠度校核结果见3.1节。

2.1 吊车荷载效应标准值的计算

1.2节中的吊车荷载组合效应标准值 S_{DS} 和 S_{DH} ,指吊车梁上作用规格相同的两台吊车,且荷载位于影响线上最不利位置时,按简支梁设计的梁跨间绝对最大内力(弯矩或剪力)标准值,设计时取内力包络图中绝对最大内力对应的截面作为控制截面^[9]。吊车梁跨间绝对最大弯矩对应的控制截面,在离跨中较近的某个位置;跨间绝对最大剪力对应的控制截面,在考虑“退轮”现象的距离支座 h_0 或 $l_0/6$ (两者取较小值)处,其中 h_0 为吊车梁计算截面高度,取梁跨的 $1/10 \sim 1/5$ ^[14],为吊车梁的计算跨度。

校核截面抗弯承载能力设计时,近似取吊车梁跨中截面作为最不利截面,考虑两台吊车组合时跨中绝对最大弯矩,作为设计最大弯矩标准值,即为荷载组合效应标准值,吊车最不利位置如图1所示,其中第一台吊车位于影响线上的最不利位置,第二

台吊车紧靠第一台吊车,位于其相邻位置。校核斜截面抗剪承载能力设计时,不考虑“退轮”现象,取支座截面为剪力设计截面,由于吊车轮距与梁跨比值的不同导致梁端截面最大剪力值不同,如图2所示两种不同吊车最不利位置对应的情况,其中第一台吊车的左轮2(a)或右轮2(b)位于支座剪力影响线上的最不利位置,第二台吊车紧靠第一台吊车,位于其相邻位置,设计时取图2(a)或图2(b)两种情况剪力计算结果的较大值。

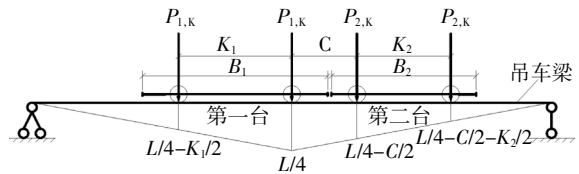
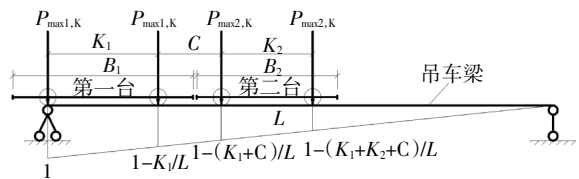
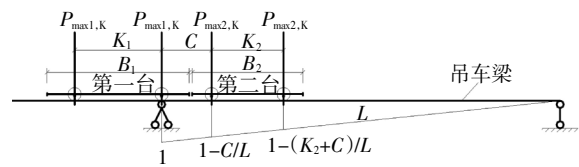


图1 吊车梁跨中弯矩影响线及吊车荷载最不利布置

Fig.1 Mid-span bending moment influence line and most unfavorable layout of crane loads



(a) $K_1 < L/3$



(b) $K_1 \geq L/3$

图2 吊车梁支座剪力影响线及吊车荷载最不利布置图

Fig.2 Support-shear influence line and most unfavorable layout of crane loads

图中, L 为吊车梁跨度; B_i 、 K_i ($i = 1, 2$)分别为第 i 台吊车的宽度和轮距; C 为相邻两台吊车的相邻轮间距,简化取为 $C = (B_1 + B_2 + K_1 + K_2)/2$; $P_{i,k}$ ($i = 1, 2$)代表吊车荷载标准值(吊车竖向荷载标准值 $P_{\max 1,k}$ 、 $P_{\max 2,k}$ 或横向水平荷载标准值 $H_{1,k}$ 、 $H_{2,k}$); $P_{\max 1,k}$ 、 $P_{\max 2,k}$ 分别为第一、二台吊车竖向荷载的标准值(取吊车额定最大轮压^[2])。根据图中所示的吊车最不利位置和影响线竖标值,吊车梁设计对应的吊车竖向荷载、横向水平荷载组合效应标准值分别为:

$$S_{DS} = P_{\max 1,k} y_{1\max} + P_{\max 2,k} y_{2\max} \quad (13)$$

$$S_{DH} = H_{1,k} y_{1\max} + H_{2,k} y_{2\max} \quad (14)$$

式中: $y_{1\max}$ 、 $y_{2\max}$ 分别为第一台、第二台吊车影响线竖

标之和,正截面抗弯承载力设计,由图 1 取 $y_{1max} = (L - K_1)/2, y_{2max} = \begin{cases} (L - K_2)/2 - C & L/2 > C + K_2 \\ L/4 - C/2 & C + K_2 > L/2 > C \end{cases}$, 作用两台规格相同的吊车时,取 $B_1 = B_2 = B, K_1 = K_2 = K$, 计算 $y_{1max} + y_{2max} = \begin{cases} L - B & B > L/2 \\ 3L/4 - B/2 & L/2 < B < L/2 < K \end{cases}$; 斜截面抗剪承载力设计,由图 2 情形(a)取 $y_{1max} = 2 - K_1/L, y_{2max} = 2 - (2K_1 + K_2 + 2C)/L$, 作用两台规格相同吊车时, $y_{1max} + y_{2max} = 4 - (2K + 2B)/L$; 情形(b)取 $y_{1max} = 1, y_{2max} = 2 - (K_2 + 2C)/L$, 作用两台规格相同吊车时, $y_{1max} + y_{2max} = 3 - (2B - K)/L$. 取两台吊车额定最大轮压相同,若 $K_1 < L/3$ 时,情形(a)的吊车荷载组合效应标准值较情形(b)大,设计选用情形(a);若 $K_1 \geq L/3$ 时,情形(b)的吊车荷载组合效应标准值较情形(a)大,设计选用情形(b). 吊车横向水平荷载标准值($H_{1,k}, H_{2,k}$),近似取横向水平荷载总作用值等分至每个轮子的荷载值. 其中横向水平荷载的总作用值,由吊车类型和额定起重量的不同,取横行小重

量与额定起重量(Q_{HK})和的下列百分数 $\omega^{[2]}$.

- 对软钩吊车: $Q_{HK} \leq 10 t$ 12%
- 10 t < $Q_{HK} < 75 t$ 10%
- $Q_{HK} \geq 75 t$ 8%

对硬钩吊车: 20%

吊车梁设计可靠度校核时,考虑作用两台规格相同的吊车,额定最大轮压为 $P_{max,k}$,单个轮子吊车横向水平荷载标准值为 H_k ,上述各参数代入式(6)~式(8),即可确定吊车梁抗力标准值 R_k 的具体表达式.当作用两台规格不同的吊车时,其设计可靠度控制水平介于相同规格上下界吊车的吊车梁校核结果之间.

2.2 吊车荷载组合效应的概率模型及统计参数

参考文献[5],吊车竖向荷载组合效应 S_{DS} 、横向水平荷载组合效应 S_{DH} 的概率模型,均取为极值 I 型分布,统计参数确定如下:由调查统计结果确定荷载任意时点值的统计参数,由平稳二项随机过程理论和最大值模型,计算荷载设计基准期内最大值的统计参数,见表 1;由影响线法和修正的 Turkstra 组合

表 1 吊车荷载的统计参数及荷载效应比的取值

Tab.1 Statistical parameters of crane load and the values of the ratio of load action effect

工作制	额定起重量 Q_{HK}/t	平均值		标准差		可靠度校核时荷载效应比的取值范围		
		任意时点值	50 年最大值	任意时点值	50 年最大值	正截面抗弯		斜截面抗剪
						ρ_1	ρ_2	ρ_3
竖向荷载 (轮压)	2	0.520	0.559	0.055	0.055			
	3	0.460	0.511	0.071	0.071	0.1~0.3	0.1~0.4	0.2~0.6
	5	0.370	0.419	0.069	0.069			
	5	0.610	0.636	0.037	0.037	0.3~0.8	0.1~0.3	0.7~1.5
	10	0.520	0.552	0.045	0.045	0.5~0.9	0.2~0.4	1.0~1.7
	15/3	0.490	0.526	0.050	0.050	0.5~1.0	0.2~0.5	1.0~1.8
	20/5	0.420	0.449	0.041	0.041	0.5~1.1	0.2~0.5	1.0~2.0
	5	0.640	0.691	0.071	0.071	0.3~0.8	0.1~0.3	0.7~1.5
	10	0.490	0.539	0.069	0.069	0.5~0.9	0.2~0.4	1.0~1.7
	15/3	0.500	0.540	0.056	0.056	0.5~1.0	0.2~0.6	1.0~1.8
30/5	0.460	0.506	0.065	0.065	0.8~1.4	0.2~0.5	1.6~2.8	
50/10	0.380	0.416	0.050	0.050		—		
额定起重量 Q_{HK}/t		平均值		标准差		ω		
横向水平荷载	5	0.079	0.099	0.028	0.028	0.12		
	10	0.053	0.064	0.016	0.016	0.12		
	20	0.046	0.056	0.014	0.014	0.1		
	30	0.043	0.051	0.011	0.011	0.1		
	75	0.038	0.047	0.013	0.013	0.08		

注:表中吊车竖向荷载的平均值和标准差应乘以吊车额定最大轮压 W_{max} ;横向水平荷载的平均值和标准差应乘以小车重量与额定起重量 Q_{HK} 的和.

规则,考虑多台吊车荷载空间位置的变异性,确定两台吊车荷载组合效应 S_{DS} 、 S_{DH} 的统计参数,借助图 1 和图 2 的影响线,具体计算如下。

2.2.1 确定影响线竖标

1) 正截面抗弯承载力设计

固定第一台吊车(主导吊车)在最不利位置(图 1),第二台吊车在影响线另一侧 $L/2$ 范围内随机移动。此时第一台吊车影响线竖标之和 y_1 为标量 $y_1 = (L-K)/2$,第二台吊车影响线竖标之和 y_2 为变量

若 $B < L/2$, y_2 服从分段的均匀分布

$$y_2 = \begin{cases} (L-K)/2 - d & C \leq d < L/2 - K \\ L/4 - d/2 & L/2 - K \leq d \leq L/2 \end{cases} \quad (15)$$

若 $L/2 < B < L/2 + K$, y_2 服从均匀分布

$$y_2 = L/4 - d/2 \quad C \leq d \leq L/2 \quad (16)$$

式中: d 为第一台吊车和第二台吊车相邻轮间距,服从均匀分布 $d \sim U[C, L/2]$; C 为相邻两台吊车相邻轮间距, $C = B - K$; 取 $y_2 = P_1 \cdot [(L-K)/2 - d] + P_2 \cdot [L/4 - d/2]$, P_1 、 P_2 分别指相邻轮间距 d 取在式(15)第一、二段区间的概率,即 $P_1 = 1 - P_2$, $P_2 = 2K/(L - 2C)$,若 $P_2 > 1$,则取 $P_2 = 1$,即可将式(16)与式(15)合并。综上所述,计算第二台吊车影响线竖标之和 y_2 的均值和标准差为:

$$\mu_{y_2} = \frac{(L-K)}{2} - P_2 \cdot \frac{(L-2K)}{4} - \mu_d \cdot \frac{(2-P_2)}{2} \quad (17)$$

$$\sigma_{y_2} = (2 - P_2) \cdot \sigma_d / 2 \quad (18)$$

2) 斜截面抗剪承载力设计

固定第一台吊车(主导吊车)在最不利位置(见图 2),第二台吊车在另一侧梁跨范围内随机移动。此时第一台吊车影响线竖标之和 y_1 为标量,第二台吊车影响线竖标之和 y_2 为变量。

若 $K < L/3$,取图 2(a)情形,第一台吊车影响线竖标之和 $y_1 = 2 - K/L$,第二台吊车影响线竖标之和 y_2 服从分段的均匀分布

$$y_2 = \begin{cases} 2 - (3K+2d)/L & C \leq d < L-2K \\ 1 - (K+d)/L & L-2K \leq d \leq L-K \end{cases} \quad (19)$$

式中: d 服从均匀分布 $d \sim U[C, L - K]$, $\mu_d = (L + B - 2K)/2$, $\sigma_d = (L - B)/2\sqrt{3}$, $C = B - K$ 。根据均匀分布的特征,取 $y_2 = P_1 \cdot [2 - (3K+2d)/L] + P_2 \cdot [1 - (K+d)/L]$,其中 P_1 、 P_2 分别指 d 取在式(19)的第一、二段区间的概率, $P_1 = 1 - P_2$, $P_2 = K/(L - B)$ 。第二台吊车影响线竖标之和 y_2 的均值和标准差分别为:

$$\mu_{y_2} = (1+P_1) \cdot (1-\mu_d/L) - (1+2P_1) \cdot K/L \quad (20)$$

$$\sigma_{y_2} = (1+P_1) \cdot \sigma_d/L \quad (21)$$

若 $K \geq L/3$,取图 2(b)情形。第一台吊车影响线竖标之和 $y_2 = 1$,第二台吊车影响线竖标之和 y_2 服从分段的均匀分布

$$y_2 = \begin{cases} 2 - (K+2d)/L & C \leq d < L-K \\ 1 - d/L & L-K \leq d \leq L \end{cases} \quad (22)$$

式中: d 服从均匀分布 $d \sim U[C, L]$, $\mu_d = (L + B - K)/2$, $\sigma_d = (L - B + K)/2\sqrt{3}$ 。根据均匀分布的特征,取 $y_2 = P_1 \cdot [2 - (K+2d)/L] + P_2 \cdot [1 - d/L]$,其中 $P_1 = 1 - P_2$, $P_2 = K/(L - C)$ 。第二台吊车影响线竖标之和 y_2 的均值和标准差分别表示为:

$$\mu_{y_2} = (1+P_1) \cdot (1-\mu_d/L) - P_1 \cdot K/L \quad (23)$$

$$\sigma_{y_2} = (1+P_1) \cdot \sigma_d/L \quad (24)$$

2.2.2 计算 S_{DS} 和 S_{DH} 的统计参数

在确定了吊车荷载影响线竖标之和的统计特征后,采用修正的 Turkstra 组合规则,计算 S_{DS} 和 S_{DH} 的统计参数:取第一台吊车荷载为设计使用年限内的最大值;第二台吊车荷载为任意时刻“半载”(工作级别为 A6~A8)或“空载”(工作级别为 A1~A5)的值,即考虑第二台吊车参与组合时,小车吊重为额定起重量的一半或为零,并依此对吊车荷载任意时点值的统计参数进行折减。本文对钢筋混凝土吊车梁图集(04G323-1、04G323-2)^[5]中,常用工程起重机的规格参数进行分析,对工作级别为 A6~A8 的吊车,“半载”与“满载”时最大轮压计算值的比值取平均为 0.77,“半载”与“满载”时横向水平荷载计算值的比值取平均为 0.63;对工作级别为 A1~A5 的吊车,“空载”与“满载”时最大轮压计算值的比值取平均为 0.51,“空载”与“满载”时横向水平荷载计算值的比值取平均为 0.25。表 1 中给出的吊车荷载任意时点值的统计参数为“满载”时的值,因此在计算两台吊车荷载组合效应统计参数时,第二台吊车荷载任意时点值的统计参数需作如下修正:均值取表 1 中统计均值乘上述比值后的折减值,并保守取标准差不变,称上述修正采用的比值为折减系数 α_w 或 α_H :即对工作级别为 A1~A5 的吊车,取 $\alpha_w = 0.51$, $\alpha_H = 0.25$,对工作级别为 A6~A8 的吊车,取 $\alpha_w = 0.77$, $\alpha_H = 0.63$ 。由前述,按误差传递公式确定的吊车竖向荷载组合效应 S_{DS} 的均值和标准差计算如下:

$$u_{S_{DS}} = u_{P_{max}} y_1 + \alpha_w u_{P_{max}} u_{y_2} \quad (25)$$

$$\sigma_{S_{DH}} = (\sigma_{P_{max,r}}^2 \gamma_1^2 + \sigma_{P_{max,l}}^2 u_{y_2}^2 + a_w^2 u_{P_{max,l}}^2 \sigma_{y_2}^2)^{0.5} \quad (26)$$

吊车横向水平荷载组合效应 S_{DH} 的均值和标准差为:

$$u_{S_{DH}} = u_{H_r} \cdot \gamma_1 + a_H u_{H_l} \cdot u_{y_2} \quad (27)$$

$$\sigma_{S_{DH}} = (\sigma_{H_r}^2 \cdot \gamma_1^2 + \sigma_{H_l}^2 \cdot u_{y_2}^2 + a_H^2 u_{H_l}^2 \cdot \sigma_{y_2}^2)^{0.5} \quad (28)$$

式中: $u_{P_{max,r}}$ 、 $\sigma_{P_{max,r}}$ 和 u_{H_r} 、 σ_{H_r} 分别为吊车竖向荷载、横向水平荷载在设计使用年限(一般为 50 年)内最大值的均值和标准差; $u_{P_{max,l}}$ 、 $\sigma_{P_{max,l}}$ 和 u_{H_l} 、 σ_{H_l} 分别为吊车竖向荷载、横向水平荷载任意时点值的均值和标准差, 参数取值参见表 1.

3 校核结果与分析

根据功能函数、抗力和荷载效应的概率模型和统计参数, 采用一次二阶矩法(FORM)校核吊车梁设计可靠指标时, 涉及多个参量 L 、 B 、 K 、 S_{G_k} 、 $P_{max,k}$ 、 H_k . 为保证校核结果的代表性, 将上述参量以比值的形式转换为无量纲量: 定义 $\eta = B/L$, $\varepsilon = K/B$, 正截面抗弯承载力设计时 $\rho_1 = 0.25W_k \cdot L/S_{G_k} = P_{max,k}/G_k$, $S_{G_k} = G_k L/4$, $\rho_2 = 2.5(Q_{Hk} + g)/P_{max,k}$, 斜截面抗剪承载力设计时 $\rho_3 = P_{max,k}/S_{G_k} = 2P_{max,k}/G_k$, $S_{G_k} = 0.5G_k$, 此

时可靠度校核结果仅与 η 、 ε 、 ρ_1 、 ρ_2 、 ρ_3 的取值相关. 根据吊车梁图集(04G323-1、04G323-2)中常见的吊车梁参数和吊车规格, 确定上述各参量的取值范围, η 取 0.4~1.2, ε 取 0.6~0.9, ρ_1 、 ρ_2 、 ρ_3 取值见表 2, 其中 ρ_3 对应吊车梁设计时, S_{G_k}/S_{DS_k} 的值均满足 $S_{G_k}/S_{DS_k} \leq 2.8$.

3.1 设计可靠指标校核结果

编制 MATLAB 程序, 校核吊车梁正截面抗弯(单向抗弯和双向抗弯)、斜截面抗剪承载力设计可靠度控制水平, 考虑参量(η 、 ε 、 ρ_1 、 ρ_2 、 ρ_3)取值范围内, 不同吊车工作制的校核结果见表 2. 校核时不考虑由疲劳控制设计的吊车梁, 根据校核结果给出各工况可靠指标校核结果最大值(β_{max})、最小值(β_{min})、均值(μ_β)和变异系数(δ_β).

由表 2 可知: 单向抗弯设计和双向抗弯设计的吊车梁, 设计可靠指标最大值分别为 7.14 和 7.09 (均为中级制 20/5 t), 最小值分别为 4.47(轻级制 3 t)和 4.76(重级制 5 t), 同类型设计可靠指标变异系数最大为 0.06, 最小为 0.02, 校核结果的整体平均值分别为 5.79 和 5.87, 均高于一般民用建筑延性破坏时的目标可靠指标(3.2), 且同类型(承担相同工作

表 2 吊车梁承载能力极限状态设计可靠度校核结果汇总

Tab.2 Reliability calibration results for the crane beams bearing capacity design

吊车 工作制	额定 起重量 Q_{Hk}/t	正截面抗弯承载力设计								斜截面抗剪承载力设计							
		单向抗弯				双向抗弯				$k_R = 1.24, \delta_R = 0.19$				$k_R = 1.84, \delta_R = 0.265$			
		β_{max}	β_{min}	μ_β	δ_β	β_{max}	β_{min}	μ_β	δ_β	β_{max}	β_{min}	μ_β	δ_β	β_{max}	β_{min}	μ_β	δ_β
轻级制 A1~A3	2	5.49	4.83	5.15	0.04	—	—	—	—	5.16	4.45	4.80	0.04	5.26	4.71	4.97	0.03
	3	4.95	4.47	4.77	0.03	—	—	—	—	4.74	4.23	4.47	0.03	4.93	4.55	4.73	0.02
	5	5.93	5.42	5.66	0.02	5.80	5.31	5.55	0.02	5.53	5.07	5.29	0.02	5.53	5.17	5.34	0.02
中级制 A4~A5	5	6.19	4.95	5.62	0.05	6.15	4.85	5.55	0.06	5.52	4.80	5.21	0.04	5.57	4.96	5.29	0.03
	10	6.48	5.24	6.06	0.05	6.42	5.20	5.99	0.05	5.83	5.13	5.61	0.03	5.81	5.21	5.61	0.03
	15/3	6.69	5.79	6.22	0.04	—	—	—	—	5.95	5.51	5.72	0.02	5.93	5.53	5.72	0.02
重级制 A6~A7	20/5	7.14	6.05	6.68	0.04	7.09	5.99	6.60	0.04	6.42	5.90	6.21	0.02	6.29	5.80	6.09	0.02
	5	5.64	4.87	5.28	0.03	5.57	4.76	5.21	0.03	4.93	4.51	4.74	0.02	4.96	4.54	4.76	0.02
	10	6.26	5.27	5.89	0.04	6.19	5.22	5.82	0.04	5.51	4.98	5.34	0.03	5.43	4.90	5.25	0.03
MAX	15/3	6.47	5.64	5.92	0.03	—	—	—	—	5.63	5.21	5.39	0.02	5.51	5.08	5.26	0.03
	30/5	6.59	6.03	6.40	0.03	6.51	5.99	6.34	0.02	5.78	5.56	5.66	0.01	5.71	5.45	5.58	0.01
	平均值	—	—	5.79	—	—	—	5.87	—	—	—	—	—	—	—	5.33	—

制相同额定起重量吊车对应的吊车梁)正截面抗弯承载能力设计可靠指标差异性不大。

斜截面抗剪设计的吊车梁,由《建筑结构设计统一标准》(GBJ 68—84)^[12]和袁健等^[13]提供的抗力参数,校核可靠指标最大值分别为 6.42 和 6.29(中级制 20/5 t),最小值分别为 4.23(轻级制 3 t)和 4.54(重级制 5 t),同类型设计可靠指标变异系数最大为 0.04,最小为 0.01,校核结果整体平均值均为 5.31 和 5.33,均高于一般民用建筑脆性破坏时的目标可靠指标(3.7),且同类型(承担相同工作制相同额定起重量吊车对应的吊车梁)斜截面抗剪承载能力设计可靠指标差异性不大。

经分析,对承担相同工作制不同额定起重量吊车的吊车梁,设计可靠指标随额定起重量的增大而增大,即承担较大吊重的吊车对应的吊车梁的设计可靠指标较高;对承担相同额定起重量不同工作制吊车的吊车梁,设计可靠指标随轻、中、重级工作制依次减小,说明吊车梁的设计可靠度水平受其相应吊车工作繁重程度的影响,越是未来承担繁重工作吊车的吊车梁,其按现行规范设计的可靠度水平越高。

正截面抗弯承载能力设计时,采用单向抗弯设计和双向抗弯设计的吊车梁,设计可靠指标相差较小,现行规范仅采用单向抗弯设计的简化方法合理可行。斜截面抗剪承载能力设计,采用文献[13]的抗力参数对应的吊车梁可靠指标高于文献[12],这与施工质量提高(均值系数提高)有利于构件可靠度的提高有关,但因统计数据基于国内外的抗剪实验,变异系数相对较大,故此处校核结果所表现的上述提高程度不明显。

总之,采用承载能力极限状态设计方法设计的吊车梁,由于设计时吊车荷载的考虑较为保守,其设计可靠指标过高,这必然会造成一定的浪费,应在考虑同工况排架柱设计可靠度控制水平下,对多台吊车荷载的组合值系数予以适当降低,具体量化结果将在其他论文分析确定。

3.2 各参量对吊车梁可靠度的影响

以最常见的承受两台额定起重量为 10 t 的中级(A4)、重级(A6)桥式起重机的吊车梁为例,取参量均值为 $\rho_1 = 0.65$ 、 $\rho_2 = 0.28$ 、 $\rho_3 = 1.3$ 、 $\eta = 1.02$ 、 $\varepsilon = 0.75$,采用控制变量法,即取一个参量在适当范围内

等差变化,其余参量为固定值,计算相应工况的可靠指标,分析各参量对吊车梁可靠度的影响,对设计及后期维护提出合理的建议。对额定起重量为 10 t 的中级(A4)、重级(A6)桥式起重机, η 取 0.9~1.2, ε 取 0.6~0.9, ρ_1 、 ρ_2 、 ρ_3 见表 1^[13]。绘制各参量对吊车梁可靠指标的影响见图 3~图 9。

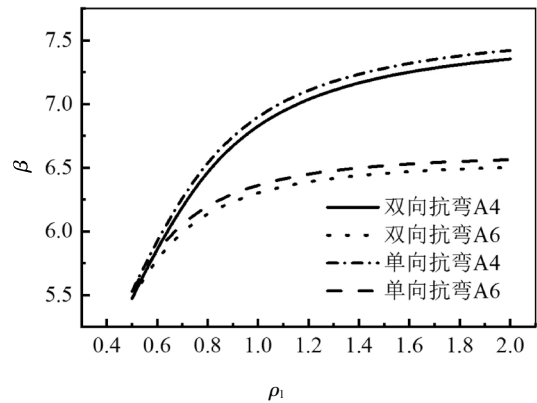


图 3 ρ_1 对吊车梁抗弯设计可靠指标的影响

Fig.3 Influence of ρ_1 for bending capacity design

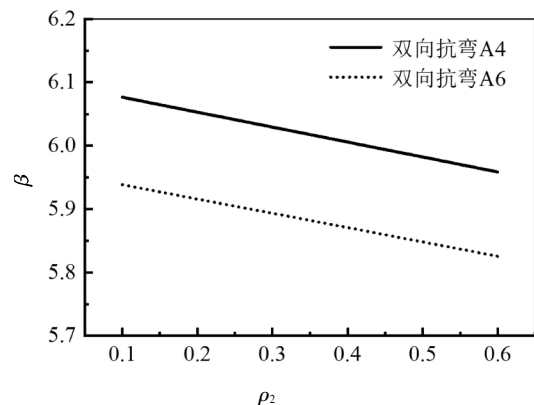


图 4 ρ_2 对吊车梁抗弯设计可靠指标的影响

Fig.4 Influence of ρ_2 for bending capacity design

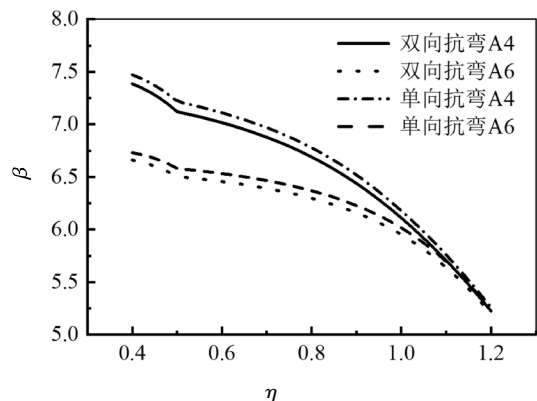


图 5 η 对吊车梁抗弯设计可靠指标的影响

Fig.5 Influence of η for bending capacity design

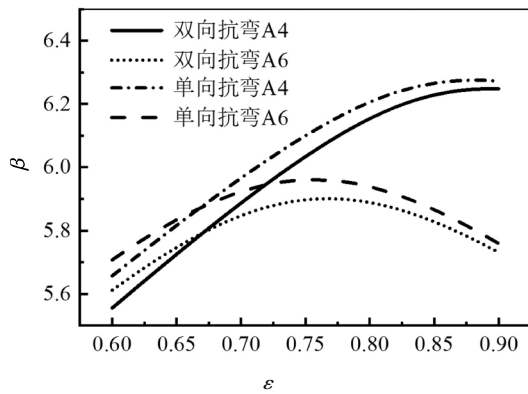


图6 ε 对吊车梁抗弯设计可靠指标的影响
Fig.6 Influence of ε for bending capacity design

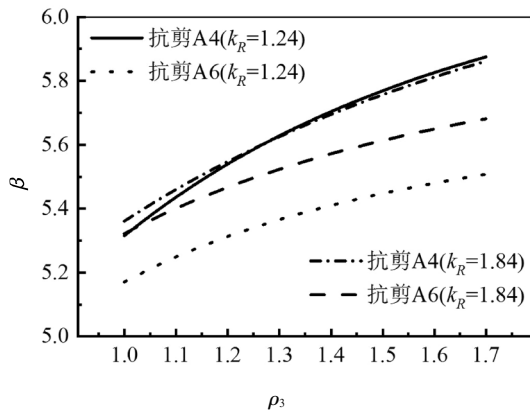


图7 ρ_3 对吊车梁抗剪设计可靠指标的影响
Fig.7 Influence of ρ_3 for shearing capacity design

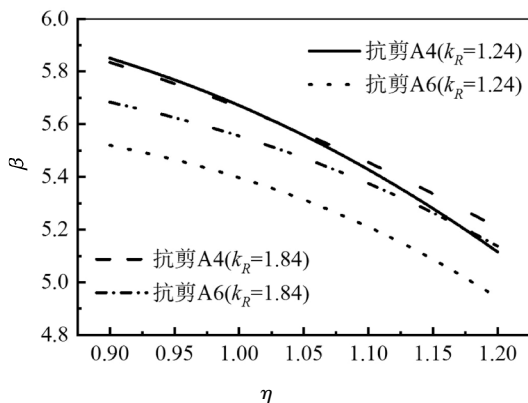


图8 η 对吊车梁抗剪设计可靠指标的影响
Fig.8 Influence of η for shearing capacity design

由图3~图9可知, 吊车梁可靠指标与参量 ρ_1 、 ρ_3 、 ε 成正相关, 与参量 ρ_2 、 η 成负相关, 其中 ρ_1 、 ρ_3 、 η 的取值对吊车梁承载力设计可靠指标的影响较 ρ_2 、 ε 明显。 ρ_1 和 ρ_2 的取值反映了设计中吊车荷载与永久荷载比值, 对吊车梁可靠指标的影响。吊车荷载

标准值是荷载概率模型中具有较高保证率的值^[5], 偏于保守; 永久荷载标准值约是荷载概率模型中的均值, 偏于冒进, 因此随着吊车荷载取值的相对增大(ρ_1 和 ρ_3 增大), 设计可靠指标也相应增加。吊车梁设计时, 可通过减轻自重, 如选择预应力混凝土梁或钢结构梁, 来提高安全性。

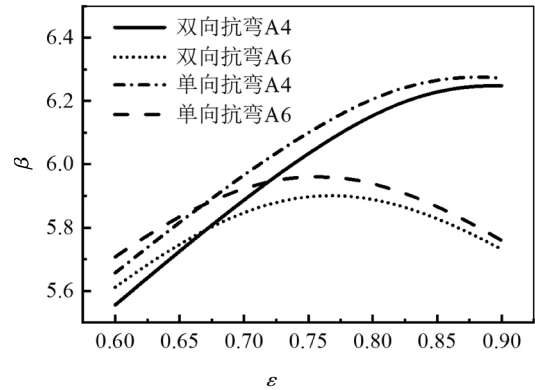


图9 ε 对吊车梁抗剪设计可靠指标的影响
Fig.9 Influence of ε for shearing capacity design

ρ_2 的取值反映了吊车横向水平荷载与竖向荷载比值, 对吊车梁可靠指标的影响。吊车运行时横向制动力越大, 吊车梁的可靠指标越小, 建议通过设置制动桁架或其他措施, 分担制动力, 提高安全性。同时, 吊车运行过程中起重量较大时, 降低制动速度; 吊车梁服役期间, 定期检查并矫正吊车轨道, 降低轨道歪斜度, 均可以减小 ρ_2 的实际值, 延长吊车梁寿命。

η 的取值反映了梁跨度对吊车梁可靠指标的影响。吊车梁按影响线法设计时考虑的是吊车最不利位置; 多台吊车组合时, 梁的跨度越大, 这种考虑就越保守。 ε 的取值与吊车规格相关, 设计时由业主根据厂房运行需要提供, 厂房工艺确定后, 选取合适的吊车车型有利于提高安全性。

4 结论

基于吊车梁承载力极限状态设计方法和吊车荷载及多台吊车荷载组合效应的概率模型, 考虑吊车梁图集中常用规格吊车及吊车梁尺寸, 采用基本参量无量纲化的方法, 在参量常用经验取值范围内, 校核非疲劳设计控制的吊车梁的设计可靠度控制水

平:单向抗弯和双向抗弯设计可靠指标平均值分别为 5.79 和 5.87,相差不大且均高于一般民用建筑延性破坏目标可靠指标(3.2);斜截面抗剪设计可靠指标平均值为 5.31(5.33),高于一般民用建筑目标可靠指标(脆性破坏 3.7),且随着施工质量提高,可靠度水平提高。

校核结果表明,采用承载能力极限状态设计方法设计吊车梁时,采用仅考虑垂直抗弯的简化方法可行,但设计可靠度控制水平较高,设计过于保守,必然造成一定的浪费。在校核同工况下排架柱的可靠度控制水平后,建议对多台吊车荷载组合时的组合值系数予以适当降低。同时,通过定量分析各参量对吊车梁可靠指标的影响,建议设计时选择轻质高强梁、设置制动桁架、选取合适的吊车车型。吊车梁服役期间,建议定期检查并矫正吊车轨道,吊起较重物品时,适当降低制动速度,以延长吊车梁使用寿命。

参考文献

- [1] GB 50153—2008 工程结构可靠性设计统一标准 [S].北京:中国工业出版社,2008:14—16.
GB 50153—2008 Unified standard for reliability design of engineering structures [S]. Beijing:China Architecture and Building Press,2008:14—16.(In Chinese)
- [2] GB 50009—2012 建筑结构荷载规范[S].北京:中国工业出版社,2012:9—12.
GB 50009—2012 Load code for the design of building structures [S].Beijing:China Architecture and Building Press,2012:9—12.(In Chinese)
- [3] 邵卓民.结构概率极限状态设计法的进展——国际标准《结构可靠性总原则》(1996)综述(四)[J].建筑结构,1998(10):55—60.
SHAO Z M.Progress of the structural probability limit state design method—International Standard "General Principles of Structural Reliability" (1996) summary (four) [J].Building Structures, 1998 (10): 55—60.(In Chinese)
- [4] GB 50068—2018 建筑结构可靠性设计统一标准 [S].北京:中国工业出版社,2018:25—26.
GB 50068—2018 Unified standard for reliability design of building structures [S].Beijing:China Architecture and Building Press, 2018:25—26.(In Chinese)
- [5] YAO J T, GU H, CHEN L Z. Probability analysis of crane load and load combination actions [J]. Mathematical Problems in Engineering, 2018, 11: 1—13.
- [6] ISO 239—2015 General principles on reliability for structures [S]. Geneva: International Organization for Standardization, 2015: 41—47.
- [7] EN 1990:2002 Euro code – basis of structural design [S]. Brussels: European Communities and European Committee for Standardisation 2002: 38—47.
- [8] GB 50010—2015 混凝土结构设计规范[S].北京:中国工业出版社,2015:7—10.
GB 50010—2015 Code for design of concrete structures [S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2015: 7—10. (In Chinese)
- [9] GB 50906—2013 机械工业厂房结构设计规范[S].北京:中国计划出版社,2013:37.
GB 50906—2013 Code for design of machinery industry workshop structures [S]. Beijing: China Plan Press, 2013: 37. (In Chinese)
- [10] YS 06—78 钢筋混凝土吊车梁设计规程[S].北京:冶金工业出版社,1978:10—11.
YS 06—78 Design procedures for the reinforced concrete crane beams [S]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1978: 10—11. (In Chinese)
- [11] 张望喜,刘有,程超男.考虑施工误差影响的 RC 框架结构可靠性分析[J].湖南大学学报(自然科学版),2017,44(7):69—77.
ZHANG W X, LIU Y, CHENG C N. Reliability analysis of reinforced concrete frame structure considering the influence of construction error [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2017, 44(7): 69—77. (In Chinese)
- [12] GB J68—84 建筑结构设计统一标准[S].北京:中国工业出版社,1984:42—45.
GB J68—84 Unified standard for design of building structures [S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 1984: 42—45. (In Chinese)
- [13] 袁健,易伟建.钢筋混凝土梁受剪承载力可靠度分析[J].建筑结构学报,2017,38(4):109—128.
YUAN J, YI W J. Reliability analysis of shear capacity of reinforced concrete beams [J]. Journal of Building Structures, 2017, 38(4): 109—128. (In Chinese)
- [14] 沈蒲生,梁兴文.混凝土结构设计原理[M].北京:高等教育出版社,2012:66—67.
SHEN P S, LIANG X W. Concrete structure design principle [M]. Beijing: Higher Education Press, 2012: 66—67. (In Chinese)
- [15] 04G323-1, 04G323-2 钢筋混凝土吊车梁图集[S].北京:中国建筑标准设计研究院,2004:37—40.
04G323-1, 04G323-2 Design chart of crane beam [S]. Beijing: China Institute of Building Standard Design & Research, 2004: 37—40. (In Chinese)