

文章编号:1674-2974(2016)03-0032-09

## 基于刚性节段模型风洞试验的输电导线 阻力系数研究\*

王述良<sup>1</sup>, 梁枢果<sup>1†</sup>, 邹良浩<sup>1</sup>, 吴海洋<sup>2</sup>

(1. 武汉大学 土木建筑工程学院, 湖北 武汉 430072;

2. 中国电力工程顾问集团 中南电力设计院有限公司, 湖北 武汉 430071)

**摘要:**为了研究多分裂导线静力风荷载,进行了原尺寸刚性节段模型测力风洞试验,计算得到了多种直径导线阻力系数,并分析了包括雷诺数效应、屏蔽效应等因素对其结果的影响.研究表明,导线阻力系数试验结果较规范取值小,且由于导线表面粗糙度及紊流度的增加,会使其临界区雷诺数范围提前,尽管导线雷诺数处于名义的亚临界区域,其阻力系数依然随雷诺数变化比较敏感.对于多分裂导线而言,由于上游导线的遮挡干扰,导线整体阻力系数有所降低,必须考虑这种屏蔽效应的影响.拟合得到了考虑雷诺数效应以及屏蔽效应在内的输电导线阻力系数经验公式,为输电导线静力风荷载的计算提供一定的参考.

**关键词:**多分裂输电导线;风洞试验;阻力系数;雷诺数效应;屏蔽效应;经验公式

**中图分类号:**TU312.1; TU972.8

**文献标识码:**A

## Study on Drag Coefficients of Conductors Based on Wind Tunnel Tests of Rigid Sectional Model

WANG Shu-liang<sup>1</sup>, LIANG Shu-guo<sup>1†</sup>, ZOU Liang-hao<sup>1</sup>, WU Hai-yang<sup>2</sup>

(1. School of Civil Engineering, Wuhan Univ, Wuhan, Hubei 430072, China;

2. Central Southern China Electrical Power Design Institute of China Power Engineering Consulting Group, Wuhan, Hubei 430071, China)

**Abstract:** In order to investigate the static wind forces on the multi-bundled conductors, based on the wind tunnel force balance tests for rigid sectional models of single and multi-bundled conductors, drag coefficients and the influence of Reynolds number effects and shielding effects were analyzed. The results illustrate that the drag coefficients obtained by the wind tunnel tests are much smaller than those specified in the Code. And because of the surface roughness of the conductors as well as the flow turbulence, the range of Reynolds numbers in the critical region was brought forward. Moreover, although the Reynolds numbers are within the subcritical range, the drag coefficients are still very sensitive to the variance of the Reynolds numbers. For the multi-bundled conductors, the interference caused by the upstream lines reduces the integrated drag coefficients. It is stated that the influences of the shielding effects should be considered. Finally, an empirical formula involving the Reynolds number effects and shielding effects was proposed to calculate the drag coefficients of the bundled conductors, which provides references for calculating

\* 收稿日期:2015-05-05

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51078296), National Natural Science Foundation of China(51078296)

作者简介:王述良(1985-),男,湖北孝感人,武汉大学博士研究生

† 通讯联系人, E-mail: liangsgwhu@sohu.com

the static wind loads of conductors.

**Key words:** multi-bundled conductors; wind tunnel tests; drag coefficients; Reynolds number effects; shielding effects; empirical formula

与一般的土木工程结构不同,输电线路是由导、地线和各个输电杆塔连接而成的耦联体系,塔高由几十米到数百米,输电线跨度由几百米到上千米,深山峡谷和大江大河之间塔高和导线跨度更大.随着多分裂导线的应用及导线跨度的增加,导线本身的风荷载占输电塔线体系整体风荷载的比重越来越大,一般来说,对于数百米跨度的多分裂导线输电线路,作用在导线上的风荷载往往会高达输电塔总体风荷载的60%~80%<sup>[1]</sup>,由此可见,输电杆塔所受的风荷载主要来自于输电导线而非输电杆塔自身.强风作用下,特别是覆冰情况下,导线传递给输电塔的不平衡张力会引起输电塔的破坏<sup>[2]</sup>,因此,了解输电导线的静力和动力风荷载,是进行输电塔可靠度分析的重要基础<sup>[3]</sup>,对于输电塔-线体系的结构设计尤为重要.然而,国内外现行规范<sup>[4-8]</sup>有关多分裂导线静风荷载的取值却不尽合理,主要存在以下两点不足:其一,没有考虑雷诺数效应的影响,阻力系数的取值与风速无关,始终取某一定值;其二,没有考虑多分裂导线屏蔽效应的影响,分裂导线的总风荷载是以分裂导线数量乘以单根导线风荷载得到.对于低电压等级的线路,导线直径较小,分裂根数较少,其屏蔽效应相对较弱,可以忽略分裂导线的屏蔽效应对导线风荷载的影响.然而,对于特高压输电线路而言,所使用的导线直径可高达52.8 mm,且分裂数量也达到8分裂之多,其屏蔽效应不容忽视.鉴于此,Wardlaw等<sup>[9]</sup>进行了2,4,6和8分裂导线的刚体静力试验以及3维气弹试验,研究了分裂导线之间的干扰效应以及该效应对导线振动的影响. Ball等<sup>[10]</sup>分析了可能引起导线阻力系数风洞试验测量误差的多种原因,包括端部连接方式、长度与直径的比值(长宽比)等.蔡萌琦<sup>[11]</sup>等通过风洞试验测试获得在不同风速和风攻角下4分裂导线的风压阻力系数,同时采用数值模拟方法计算得到与试验模型对应的导线阻力系数,认为在计算多分裂导线的风压时,导线阻力系数按国内现行标准取值可能偏大而过于保守.张素侠等<sup>[12]</sup>通过数值模拟对4分裂导线阻力系数进行了计算,并分析了影响阻力系数的多种原因.谢强等<sup>[13-14]</sup>研究多分裂导线的整体阻力系数随迎风角度、导线直径、风速、紊流度、分裂数等的变化规律,研究结果表明对于大截面多分裂导线,特别是特高压的8分裂导线阻力系数的取值,

可以考虑导线之间的遮挡效应造成的阻力系数的减小这一有利因素.尽管对导线阻力系数的既有研究均证实规范取值偏于保守这一事实,且从多分裂导线屏蔽效应的角度分析了影响阻力系数的重要原因,但是总体而言,对屏蔽效应的分析还不够系统和完善,仅初步认识了屏蔽效应对阻力系数的影响,但并没有定量分析影响屏蔽效应本身的多种因素以及考虑这些影响因素情况下的导线阻力系数计算方法.

基于此,本文在既有研究的基础上,进行了单根导线及多分裂导线刚性节段模型测力风洞试验,将包括风速、紊流度、导线截面直径、导线分裂间距以及分裂根数等对阻力系数的影响因素归结到雷诺数效应和屏蔽效应两个方面进行分析,并从导线结构参数及流场特性两个方面对屏蔽效应进行了分析,最后提出了考虑雷诺数效应及屏蔽效应的阻力系数拟合公式,该经验公式物理意义明确,可以为多分裂导线结构设计提供一定的参考.

## 1 导线刚性节段模型测力试验设计

### 1.1 模型制作

本文以5种不同技术参数的特高压输电导线为蓝本,制作了了几何缩尺比为1:1,节段长度为0.5 m的刚性导线模型.考虑到刚性节段模型刚度和外形的影响,采用铝管作为内核模拟实际导线的钢芯,橡胶螺纹模拟实际导线的外形.橡胶螺纹模拟实际导线最外围的单根铝线的直径,为了精确地模拟实际导线外形需考虑橡胶条螺纹缠绕时的节径比.绞线中每层的任何一根单线都是按一定的绞制角度环绕一中心线作螺旋状绞捻的.按照相关技术参数规定,节径比一般取10~12,本次试验拟用节径比为11,其对应的捻角(捻股时铝线中心线与中心线之间的夹角)为74.1°.导线模型横截面如图1所示.

### 1.2 固定端板设计

本次试验涉及的多分裂导线的具体分裂数目为4,6,8分裂,4分裂底盘采用铝材制作,6和8分裂底盘采用刚度较大的有机玻璃制作而成,并进行了内部镂空和周边倒角处理,使气流可以平稳地分离,保证刚度的同时减小底盘对风场的干扰.底盘上分裂导线布设的位置分别留内丝,以便与导线下端的

外丝牢固结合. 为了考察导线分裂间距对阻力系数的影响, 在设计底盘时, 预留导线的分裂间距分别为

200, 250, 300, 400, 450 和 500 mm. 3 种多分裂底盘平面如图 2 所示.

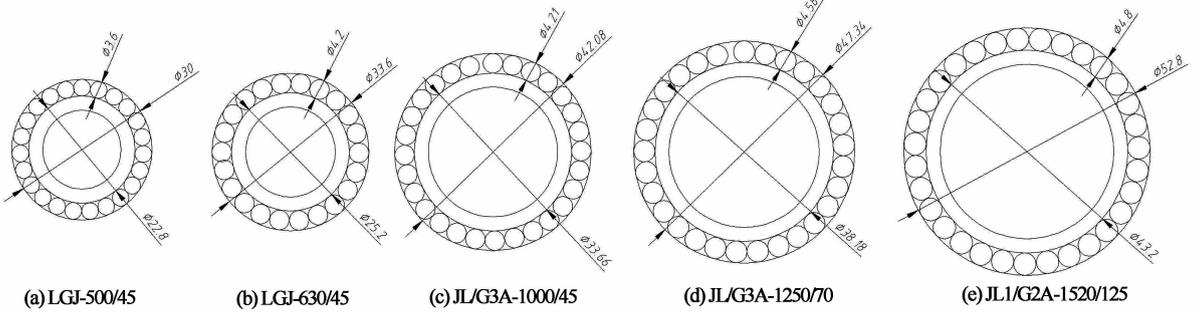


图 1 试验涉及的 5 种型号导线模型截面(单位:mm)  
Fig. 1 Sections of five conductors involved in the tests(unit:mm)

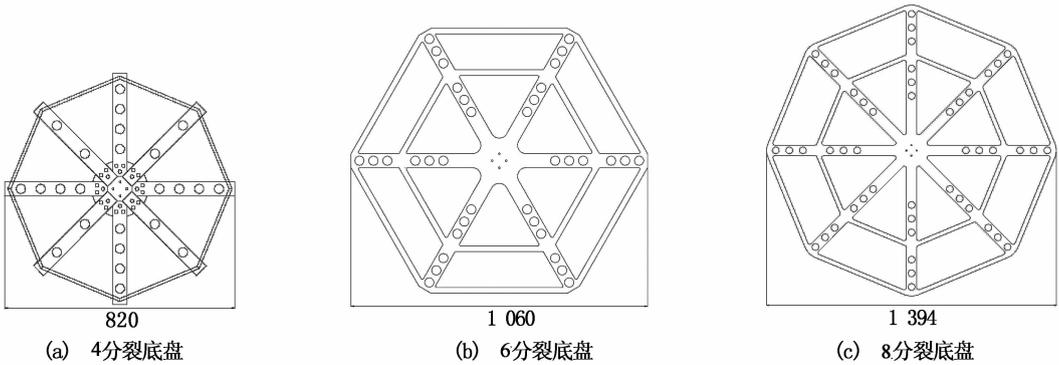


图 2 分裂底盘(单位:mm)  
Fig. 2 Fixed bases of multi-bundled conductor models(unit:mm)

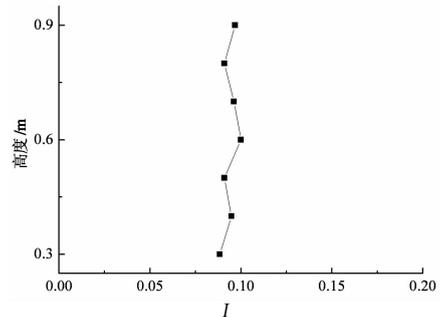
## 2 风洞试验

### 2.1 风场模拟

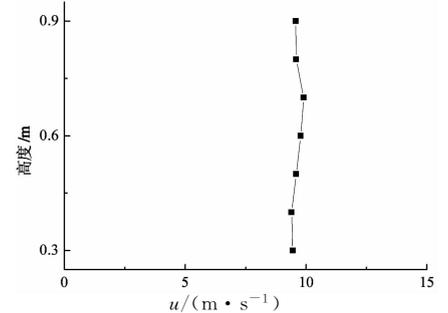
试验在武汉大学 WD-1 风洞中进行. 模拟了均匀流场以及采用布置横向和竖向格栅的方法模拟 5% 和 9.5% 两种典型均匀紊流场. 9.5% 紊流度的均匀紊流场格栅布置方式及模拟结果如图 3 所示.

### 2.2 试验工况

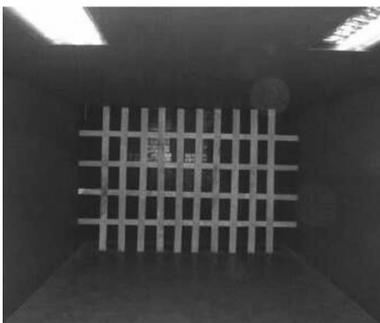
在 3 种紊流场下, 分别进行了上述 5 种型号单根导线刚性节段模型测力试验, 并对 LGJ-630/45 和 JL/G3A-1000/45 两种型号的模型导线进行



(b) 紊流度模拟



(c) 风速模拟



(a) 紊流场格栅布置

图 3 9.5% 紊流场模拟

Fig. 3 Wind field simulation of 9.5% turbulence intensity

了4、6和8分裂3种分裂根数的测试,其分裂间距为200~500 mm。试验风速为5~30 m/s。采用测力天平测试导线基底力,采样频率500 Hz,采样时间90 s,样本容量45 000;采用眼镜蛇探头测试流场风速,采样频率625 Hz,采样时间31.13 s,样本容量19 456。模型风洞试验如图4所示。为了考虑实际导线在风荷载作用下的偏转问题,本文分别设计了4、6和8分裂导线模型风攻角工况,如图5所示。试验结果采用一次消去法剔除底盘所受的风荷载,从而得到作用于导线上的荷载。

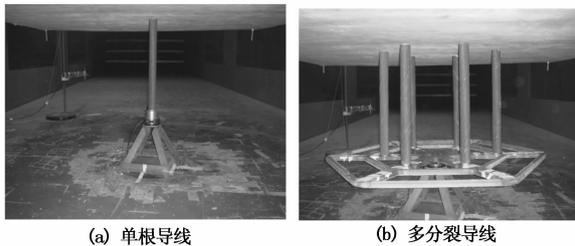


图4 模型风洞试验  
Fig. 4 Model wind tunnel tests

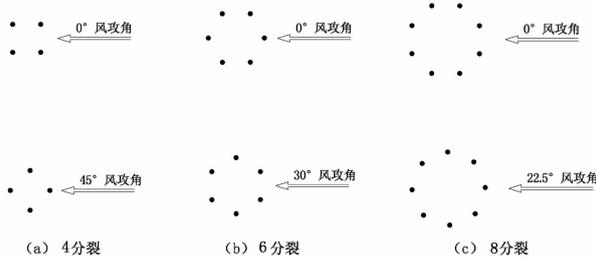


图5 试验风攻角  
Fig. 5 Attack angles of the tests

### 3 试验结果及分析

由于本次试验所涉及的导线型号以及考虑的因素较为全面,试验工况设置较多,限于篇幅,在分析导线阻力系数的影响因素时,本文仅给出了几种典型导线的试验结果,这些结果均具有类似于所有工况的普遍规律。

#### 3.1 试验结果与规范对比

中国《重覆冰架空输电线路设计技术规程》<sup>[4]</sup>、《110~750 kV 架空输电线路设计技术规范》<sup>[5]</sup>和《1 000 kV 架空输电线路设计规范》<sup>[6]</sup>规定导线或地线的阻力系数  $C_d$  取值为:当线径小于17 mm 或覆冰时(不论线径大小)应取1.2;线径大于或等于17 mm 时,取1.1。ASCE<sup>[7]</sup>与IEC<sup>[8]</sup>规定,导线的阻力系数统一取1.0,但是有直接测量结果或者有风洞试验结果的可按照测量或者试验结果取值。

按照中国规范的规定,本次试验所涉及的5种

导线直径均大于17 mm,因此单根导线的阻力系数取值应该为1.1,对于多分裂导线规范取值应该在单根导线的基础上乘以导线的分裂根数得到,多分裂导线阻力系数的取值与单根导线没有实质分别。事实上,对比阻力系数的试验结果与规范取值(如图6与图7所示)可知:在均匀流场中,相同间距,不同风速的条件下,阻力系数的试验值明显小于规范值,且多分裂导线试验值与规范值的差值比单根导线试验值与规范值的差值大得多。整体上看,随着风速的增加,导线阻力系数试验值与规范值的差值增大,并趋于稳定。在高速风速下,LGJ-630/45 单根、4和8分裂导线试验值与规范值的差值分别稳定在19.25%、25.8%、29.85%附近, JL/G3A-1000/45 单根、4和8分裂导线试验值与规范值的差值分别稳定在19.44%、26.92%、30.25%附近。因此,按照现行规范对多分裂导线阻力系数取值是偏于保守的。实际上,阻力系数试验值与规范值间的差异,在Shan<sup>[15]</sup>和Landers等<sup>[16]</sup>的研究中也被证实,这种差异被认为是由于实测线路中沿整跨导线风场的速度、风向、湍流度不同导致的。本文将针对这种差异从雷诺数效应和屏蔽效应两个方面进行分析。但在Shan的研究中同时发现,将在风洞中测量导线阻力系数的装置置于真实大气环境中测得的结果与风洞试验的结果相比具有足够的精度<sup>[15]</sup>。

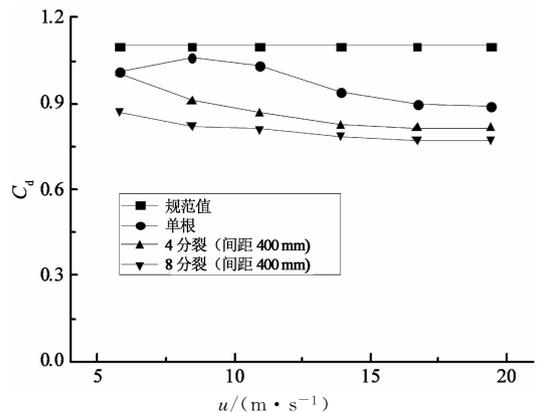


图6 不同风速 LGJ-630/45 导线  $C_d$  试验值与规范值  
Fig. 6 Comparison of drag coefficients of conductor LGJ-630/45 between tests and the Code

#### 3.2 阻力系数雷诺数效应分析

如前所述,国内外规范阻力系数取值的限定条件仅仅与导线的截面直径有关,当导线截面直径确定后,无论在何条件下,导线的阻力系数均取一定值。然而,试验结果表明导线的阻力系数随风速与导线截面直径的变化存在较大差异。图8给出了均匀流场中,单根导线阻力系数随风速及导线截面直径的变化情况,其他流场下阻力系数的变化规律类似,本文不再赘述。可知:低风速时,导线的阻力系数呈

降低趋势,当风速达到 17 m/s 左右时,导线的阻力系数略有增大,但增大的幅度很小,基本趋于稳定,导线阻力系数随风速的变化存在一个使得阻力系数趋于稳定的临界风速;导线阻力系数随其截面直径的增大而降低。

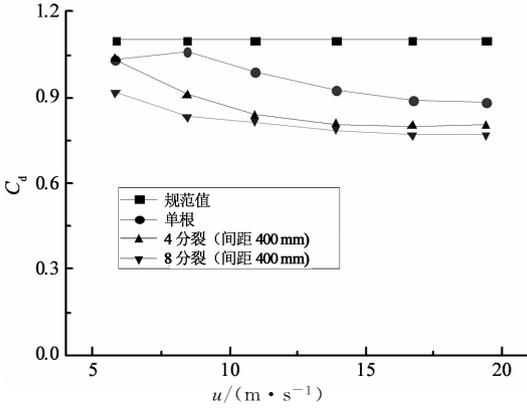


图 7 不同风速 JL/G3A-1000/45 导线  $C_d$  试验值与规范值

Fig. 7 Comparison of drag coefficients of conductor JL/G3A-1000/45 between tests and the Code

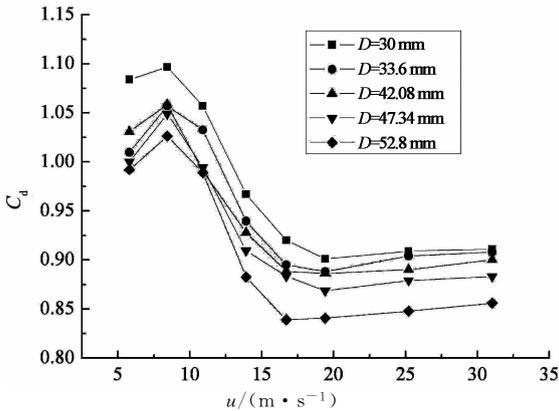


图 8 阻力系数随风速的变化

Fig. 8 Drag coefficients varying with wind speed

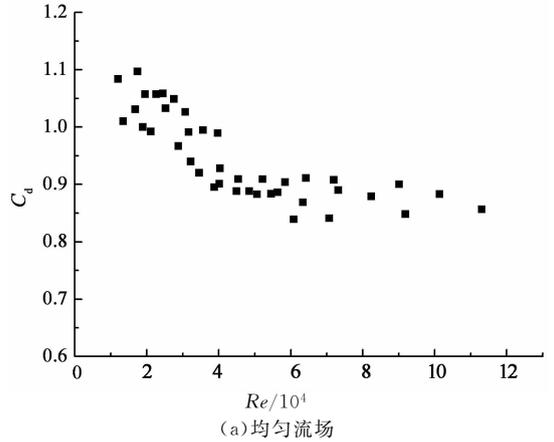
这种导线阻力系数随风速及截面直径的变化可归结于雷诺数效应,雷诺数的取值定义为:

$$Re = 69\ 000\ uD. \tag{1}$$

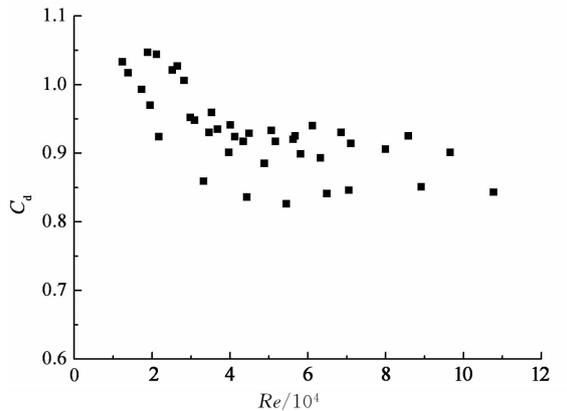
式中:  $Re$  为导线的雷诺数;  $u$  为平均风速;  $D$  为导线的截面直径。

图 9 进一步给出了均匀流场、5%紊流度均匀紊流场以及 9.5%紊流度均匀紊流场,3 种流场下,导线阻力系数随雷诺数的变化情况. 由图 9 可知,5 种截面直径导线在风速为 5~30 m/s 情况下,雷诺数为  $10^4 \sim 10^5$ ,且在此雷诺数范围内,导线的阻力系数随雷诺数先降低,然后到某一临界雷诺数时,阻力系数基本趋于稳定;对比不同流场导线阻力系数随雷诺数的变化可以发现,低紊流度时,阻力系数在某一雷诺数下的取值比较离散,但 9.5%紊流度时就相对比较集中;相对于均匀流场,紊流场的临界雷诺数

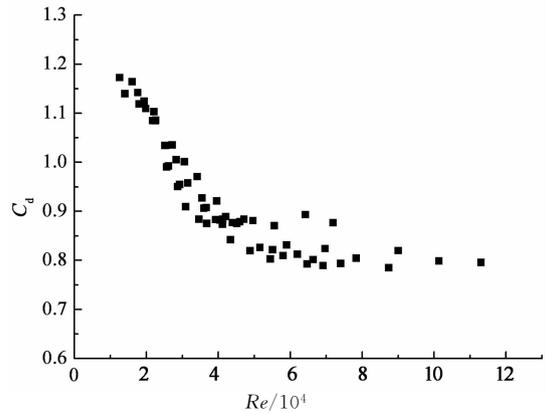
会有所提前。



(a) 均匀流场



(b) 5%紊流度均匀紊流场



(c) 9.5%紊流度均匀紊流场

图 9 单根导线阻力系数随雷诺数的变化

Fig. 9 Drag coefficients of single conductors varying with Reynolds number

上述分析表明,尽管导线雷诺数处于亚临界范围( $Re < 10^5$ ),其阻力系数仍然对雷诺数的变化比较敏感,其原因为圆截面结构表面的粗糙度以及流场的紊流度会影响雷诺数效应,即随着结构表面粗糙度的增加以及紊流度的增加,其所谓的有效雷诺数也会随之增加,阻力系数随雷诺数变化由亚临界向临界区转变的范围将被提前,使得导线雷诺数提早落入临界区.文献[17]的研究也证实了圆截面结构阻力系数随雷诺数的变化规律受结构表面粗糙度和

结构所处流场的紊流度影响较大,其结论与本文研究结果一致.

### 3.3 阻力系数屏蔽效应分析

对于多分裂导线而言,各导线间存在干扰,使得其整体的阻力系数有所降低,这种由于多分裂导线间相互干扰引起的阻力系数降低的效应定义为导线阻力系数的屏蔽效应.图 10 给出了 3 种流场下, LGJ-630/45 四分裂导线模型阻力系数随分裂间距的变化情况.图 11 给出了 2 种型号多分裂导线模型分裂间距为 400 mm 时,阻力系数随分裂根数的变化规律.可知:阻力系数随导线分裂间距的增大呈递增趋势,随分裂根数的增多呈下降趋势.总体而言,在分析导线屏蔽效应时,导线的分裂间距与分裂根数是需要考虑的两个重要因素.

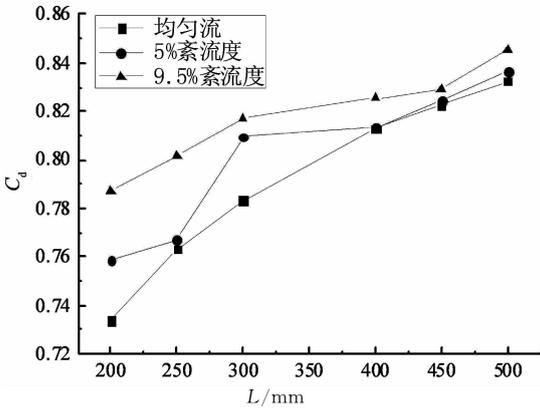


图 10 分裂间距对阻力系数的影响

Fig. 10 Influence of bundle spacing on drag coefficients of bundled conductors

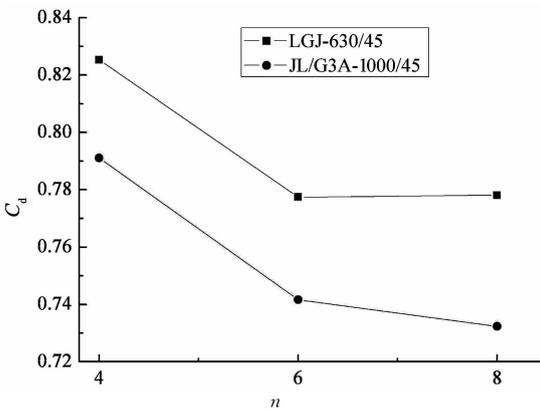


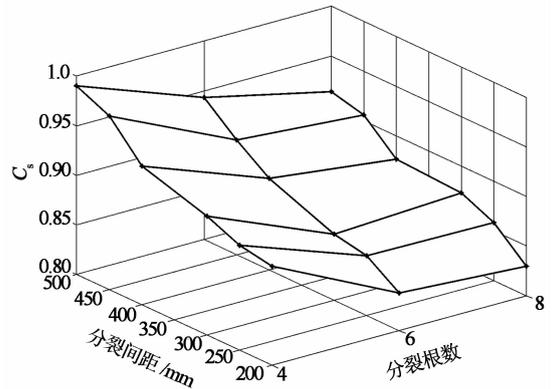
图 11 分裂根数对阻力系数的影响

Fig. 11 Influence of bundle numbers on drag coefficients of bundled conductors

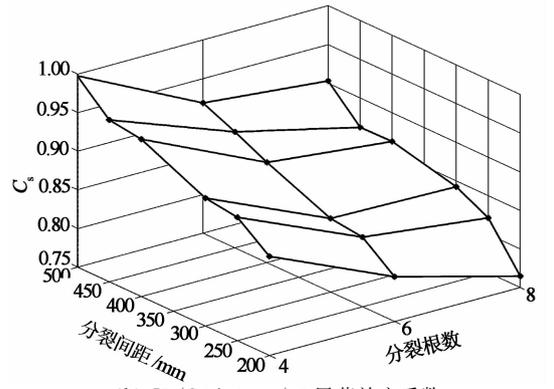
本文以多分裂导线阻力系数与单根导线阻力系数的比值,即屏蔽效应系数来表征屏蔽效应的影响程度.一般而言,屏蔽效应系数小于 1,越接近 1 说明屏蔽效应越不明显.屏蔽效应系数表示为:

$$C_s = \frac{\text{多分裂导线整体阻力系数}}{\text{单根导线阻力系数} \times \text{分裂根数}} \quad (2)$$

试验结果表明,多分裂导线的阻力系数与其分裂根数以及分裂间距有关,本文仅给出了导线 LGJ-630/45 和 JL/G3A-1000/45 在 30 m/s 时,即阻力系数基本稳定后,9.5%紊流度均匀紊流场中,高风速下的屏蔽效应系数随分裂间距与分裂根数的变化情况,如图 12 所示.可知:在其他条件不变的情况下,多分裂导线的屏蔽效应系数随分裂根数的增加而降低,随分裂间距的减小而降低;当分裂间距为 500 mm 时,导线的屏蔽效应系数接近于 1,即:此时导线的屏蔽效应不再显著;对于两种型号导线而言,相同分裂间距下,直径较大的屏蔽效应更为明显,本文所涉及的试验工况中,这两种型号屏蔽效应系数最小值分别为 0.83 和 0.77.



(a) LGJ-630/45 屏蔽效应系数



(b) JL/G3A-1000/45 屏蔽效应系数

图 12 屏蔽效应系数随分裂间距与分裂根数的变化  
Fig. 12 Shielding coefficients varying with bundle spacing and number

除了导线分裂特性会影响其阻力系数的屏蔽效应以外,流场的紊流特性同样也不可忽略,即随着风速的变化,导线的屏蔽效应会有所不同.图 13 给出了 LGJ-630/45 的 4 分裂导线模型屏蔽效应系数随风速的变化情况.由 13 图可看出,与阻力系数的雷诺效应相似,屏蔽效应系数随风速的变化同样存在一个临界风速,在此临界风速之前,屏蔽效应系数增幅较快,此后屏蔽效应系数呈降低趋势,但降幅并不显著,因此流场特性,特别是雷诺数引起的来流与结

构间的流动特性对屏蔽效应的影响同样是需要考虑的另一重要因素。

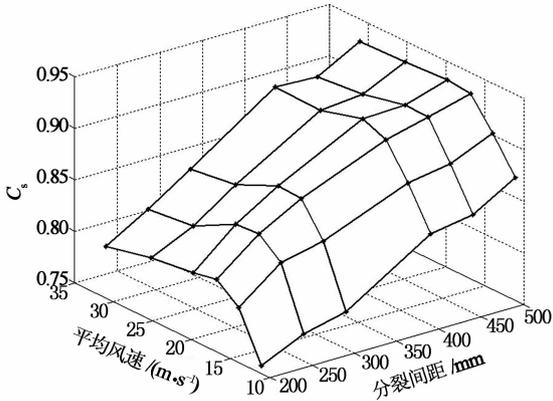


图 13 导线屏蔽效应系数随风速的变化  
Fig. 13 Shielding coefficients varying with wind speed

此外,在风荷载作用下,实际导线会发生偏转,致使来流风攻角发生变化,从而使得屏蔽效应的影响程度有所差异.图 14 给出了 LGJ-630/45 型号 4, 6 和 8 分裂导线不同风攻角下,阻力系数随风速的变化情况.可知,风攻角发生变化,在整体的迎风面上的导线数量也会发生变化,整体迎风面上的导线数量越多,屏蔽效应越明显,阻力系数就越小.从大小上来看,其他风攻角的阻力系数大体为 0 度风攻角阻力系数的 1.1 倍.尽管本文研究了不同风攻角对阻力系数的影响,但可能不足以涵盖其风攻角影响的最不利情况,因此这一方面有待进一步完善。

### 4 阻力系数拟合公式

根据 GB 5009-2012《建筑结构荷载规范》<sup>[18]</sup> 的规定.湍流度沿高度的分布可按下式计算:

$$I_z(z) = I_{10} \left(\frac{z}{10}\right)^{-\alpha} \quad (3)$$

式中:  $I_{10}$  为 10 m 高名义湍流度,对于 B 类风场而言,  $I_{10} = 0.14$ ;  $\alpha$  为地面粗糙度指数,在 B 类风场下取值为 0.15.当输电导线的悬挂高度取 80 m 左右时,其湍流度为 10% 左右.鉴于此,为了满足实际应用的需求,本文仅针对 9.5% 湍流度下的阻力系数给出拟合公式。

上节分析表明,与多分裂导线阻力系数密切相关的两个参数分别为导线的雷诺数与屏蔽效应系数,因此,本文从这两个方面入手,对多分裂导线的阻力系数进行拟合,给出了具有明确物理意义的经

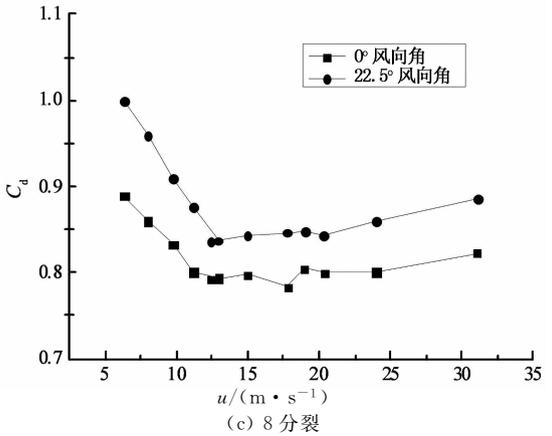
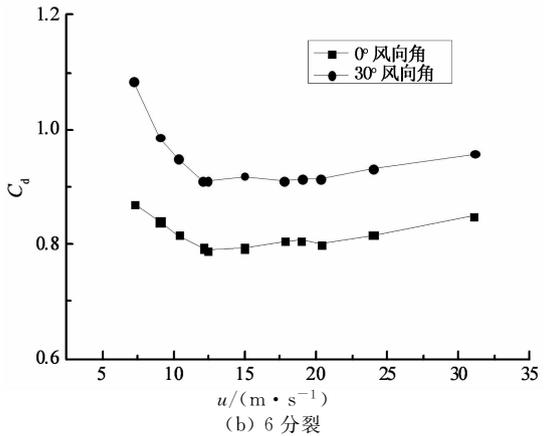
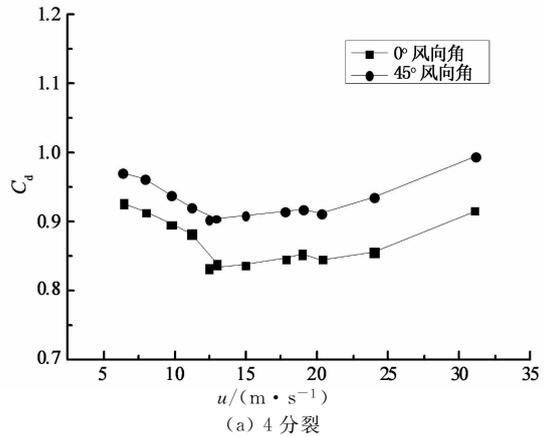


图 14 风攻角的影响  
Fig. 14 Influences of attack angle on drag coefficients

验公式,其基本组成如下:

$$C_d = f(Re, C_s) = C_{d1}(Re) \times C_s \left(\frac{S}{D}, n, u\right) k(\alpha) \quad (4)$$

式中:  $C_d$  为多分裂导线的平均阻力系数,它是雷诺数  $Re$  与屏蔽效应系数  $C_s$  的函数;  $C_{d1}$  反映的是阻力系数的雷诺数效应;屏蔽效应系数是分裂间距  $S$ , 分裂根数  $n$  以及来流平均风速的函数,为了解决拟合公式的普适性问题,定义无量纲参数距径比(分裂间

距  $S$  与导线直径  $D$  之比)来表征导线型号及分裂间距对屏蔽效应系数的影响; $k(\alpha)$  为与风攻角有关的系数, 0 度风攻角时取值为 1, 本文涉及的其他风攻角取值为 1.1. 图 15 给出了 4, 6 和 8 分裂导线屏蔽效应系数随距径比的变化规律. 可知, 屏蔽效应系数随着多分裂导线距径比的增加而增加, 对 4 分裂导线而言, 当  $S=15D$  时, 屏蔽效应系数接近于 1, 导线间的屏蔽效应可以忽略.

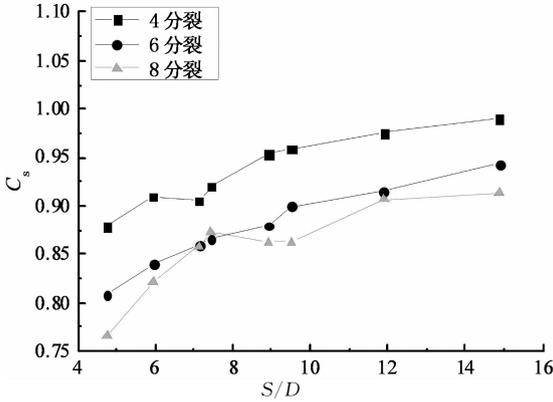


图 15 屏蔽效应系数随径距比的变化

Fig. 15 Shielding coefficients varying with  $S/D$

阻力系数随雷诺数呈现一种指数变化, 其关系由下式定义:

$$C_{d1}(Re) = C_{d0} + A \times \exp\left(-\frac{Re}{t}\right). \quad (5)$$

式中:  $C_{d0}$ ,  $A$ ,  $t$  为需要拟合的参数. 9.5% 紊流度下, 参数拟合的结果为:  $C_{d0} = 0.786$ ,  $A = 0.818$ ,  $t = 20\ 018$ .

图 16 给出了导线阻力系数随雷诺数变化的拟合结果. 可以看出数据的拟合结果与试验结果比较吻合.

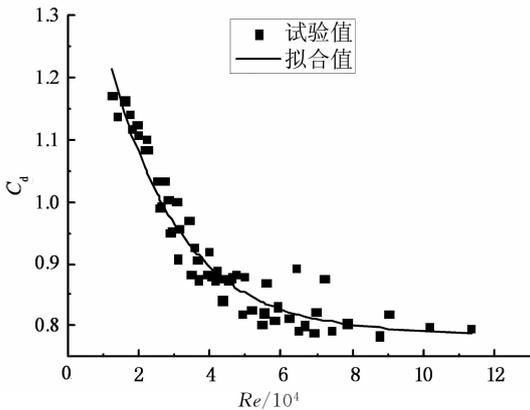


图 16 阻力系数随雷诺数变化的拟合结果

Fig. 16 Fitted results of drag coefficients varying with Reynold numbers

对屏蔽效应系数进行变量分离, 屏蔽效应系数可分解成仅与绕流雷诺数相关项和仅与多分裂导线

结构特性相关项的乘积:

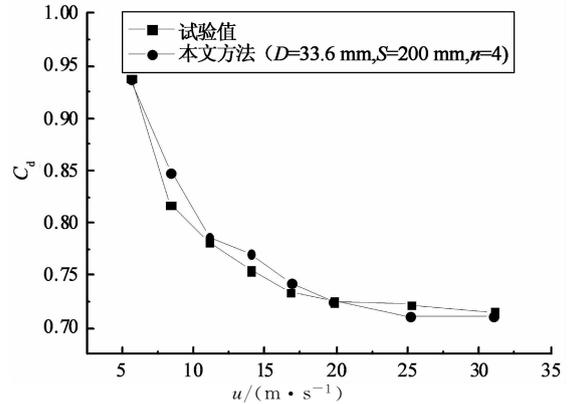
$$C_s\left(\frac{S}{D}, n, u\right) = \left[k_1(u)/\left(\frac{S}{D}\right) + b_1(u)\right]k_2(n). \quad (6)$$

式中:  $k_1(u)$ ,  $b_1(u)$  为与风速有关的参数, 由式(7)与式(8)确定;  $k_2(n)$  为与分裂根数相关的参数, 当  $n=4$  时,  $k_2(n)=1$ ;  $n=6$  时,  $k_2(n)=0.98$ ;  $n=8$  时,  $k_2(n)=0.97$ .

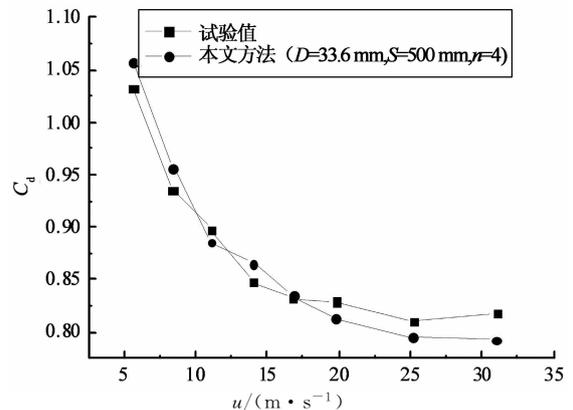
$$\begin{cases} k_1(u) = 0.003\ 64u - 1.01, & u \leq 14\ \text{m/s}, \\ k_1(u) = -1, & u > 14\ \text{m/s}; \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{cases} b_1(u) = 0.95, & u < 14\ \text{m/s}, \\ b_1(u) = 0.003\ 9u + 0.926, & u \geq 14\ \text{m/s}. \end{cases} \quad (8)$$

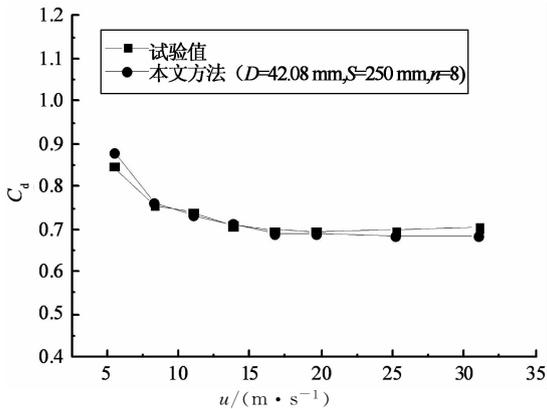
根据经验公式, 拟合的结果与试验结果对比如图 17 所示, 不同分裂间距, 分裂根数及直径的对比结果可以发现, 本文所提出的阻力系数经验公式拟合结果与试验结果比较吻合, 验证了拟合公式的可靠性. 因此, 本文方法能够为多分裂导线阻力系数的取值提供一定的参考.



(a) LGJ-630/45 四分裂导线阻力系数拟合结果 ( $D=33.6\ \text{mm}, S=200\ \text{mm}, n=4$ )



(b) LGJ-630/45 四分裂导线阻力系数拟合结果 ( $D=33.6\ \text{mm}, S=500\ \text{mm}, n=4$ )



(c) JL/G3A-1000/45 八分裂导线阻力系数拟合结果  
( $D=42.08\text{ mm}$ ,  $S=250\text{ mm}$ ,  $n=8$ )

图 17 多分裂导线阻力系数拟合结果

Fig. 17 Fitted results of drag coefficients of multi-bundled conductors

## 5 结论

通过刚性模型测力风洞试验,对 5 种截面单根导线以及 2 种截面多分裂导线阻力系数从雷诺数效应和屏蔽效应两个方面进行了分析,得到以下主要结论:

1) 无论是均匀流场还是均匀紊流场,导线阻力系数的雷诺数效应非常明显,存在一个临界雷诺数界限,使得导线阻力系数由急剧减小到趋于平稳的转变。

2) 紊流度和导线表面的螺纹会引起雷诺数效应的变化,使得导线阻力系数随雷诺数变化的临界雷诺数范围有所提前,即尽管导线的雷诺数在  $10^4 \sim 10^5$  内,导线的阻力系数依然对雷诺数比较敏感。

3) 多分裂导线的屏蔽效应比较显著。多分裂导线的分裂间距与直径之比、分裂根数以及流场特性是评估屏蔽效应影响程度的重要因素。分裂间距与直径的比值越大,屏蔽效应对阻力系数的影响就越为显著,分裂根数越多屏蔽效应越严重。

4) 现行规范没有考虑阻力系数的雷诺数效应以及多分裂导线阻力系数的屏蔽效应,使得阻力系数的取值偏于保守。

5) 提出了考虑雷诺数效应及屏蔽效应的多分裂导线阻力系数的经验公式,此公式可为多分裂导线结构设计提供一定参考。

## 参考文献

[1] JEC-127-1979 Design standards on structures for transmissions [S]. Japan, Tokyo: JEC, 1979: 39-40.  
[2] 杜运兴, 孙倩. 山区覆冰输电塔线体系风致不平衡张力的研究[J]. 湖南大学学报: 自然科学版, 2014, 41(4): 72-77.  
DU Yun-xing, SUN Qian. Analysis of the wind-induced unbalance tension of iced transmission tower-line system in mountainous area

[J]. Journal of Hunan University: Natural Sciences, 2014, 41(4): 72-77. (In Chinese)  
[3] 郑敏, 梁枢果, 熊铁华. 基于可靠度的输电塔抗风优化研究[J]. 湖南大学学报: 自然科学版, 2014, 41(6): 35-42.  
ZHEN Min, LIANG Shu-guo, XIONG Tie-hua. Study on the reliability-based wind resistant optimization of transmission line tower [J]. Journal of Hunan University: Natural Sciences, 2014, 41(6): 35-42. (In Chinese)  
[4] DL/T 5440-2009 重覆冰架空输电线路设计技术规程[S]. 北京: 中国电力出版社, 2009: 17-22.  
DL/T 5440-2009 Technical code for designing of overhead transmission line in medium & heavy icing area[S]. Beijing: China Electric Power Press, 2009: 17-22. (In Chinese)  
[5] GB 50545-2010 110~750 kV 架空输电线路设计技术规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 2010: 16-19.  
GB 50545-2010 Code for design of 110~750 kV transmission line [S]. Beijing: China Planning Press, 2010: 16-19. (In Chinese)  
[6] GB 50665-2011 1 000 kV 架空输电线路设计规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 2011: 23-29.  
GB 50665-2011 Code for design of 1 000 kV transmission line [S]. Beijing: China Planning Press, 2011: 23-29. (In Chinese)  
[7] ASCE NO. 74-2009 Guidelines for electrical transmission line structural loading[S]. USA, Reston: ASCE, 2010: 31-34.  
[8] IEC 60826-2003 Design criteria of overhead transmission lines[S]. Geneva, Switzerland: IEC, 2003: 49-53.  
[9] WARDLAW R L, COOPER K R, KO R G, et al. Wind tunnel and analytical investigations into the aero-elastic behavior of bundled conductors[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1975, 94(2): 642-654.  
[10] BALL N G, RAWLINS C B, RENOWDEN J D. Wind tunnel errors in drag measurements of power conductors[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1992, 41(1/3): 847-857.  
[11] 蔡萌琦, 严波, 刘小会, 等. 多分裂导线风压阻力系数分析[J]. 重庆大学学报, 2013, 36(1): 110-114.  
CAI Meng-qi, YAN Bo, LIU Xiao-hui, et al. Analysis of drag coefficients of bundled conductors under wind load [J]. Journal of Chongqing University, 2013, 36(1): 110-114. (In Chinese)  
[12] 张素侠, 刘习军, 李伟. 四分裂导线上风荷载变化规律研究[J]. 工程力学, 2013, 30(6): 321-326.  
ZHANG Su-xia, LIU Xi-jun, LI Wei. Study on variation law of wind loads acting on four-bundled conductors[J]. Engineering Mechanics, 2013, 30(6): 321-326. (In Chinese)  
[13] 谢强, 孙启刚, 管政. 多分裂导线整体阻力系数风洞试验研究[J]. 电网技术, 2013, 37(4): 1106-1112.  
XIE Qiang, SUN Qi-gang, GUAN Zheng. Wind tunnel test on global drag coefficients of multi-Bundled Conductors[J]. Power System Technology, 2013, 37(4): 1106-1112. (In Chinese)  
[14] 谢强, 管政. 八分裂导线阻力系数屏蔽效应风洞试验[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(19): 149-156.  
XIE Qiang, GUAN Zheng. Wind tunnel test on shielding effects on drag coefficient of 8-Bundled Conductors [J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(19): 149-156. (In Chinese)  
[15] SHAN L, JENKE L M, CANNON D D. Field determination of conductor drag coefficient[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1992, 41/44: 835-846.  
[16] LANDERS P G, ALTO P. EPRI-sponsored transmission line wind loading research[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1982, 101(8): 2460-2466.  
[17] ESDU 80025 Mean forces, pressure and flow field velocities for circular cylindrical structures single cylinder with two-dimensional flow [S]. UK, London: IHS ESDU International Plc, 1986.  
[18] GB 50009-2012 建筑结构荷载规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012: 228.  
GB 50009-2012 Load code for the design of building structures [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012: 228. (In Chinese)