管内电缆导体截面股线接触力行为分析

焦帅克^{1,2}, 刘聪^{1,2}, 张兴义^{1,2*}, 周又和^{1,2}

1. 兰州大学西部灾害与环境力学教育部重点实验室, 兰州 730000;

2. 兰州大学土木工程与力学学院, 兰州 730000

*联系人, E-mail: zhangxingyi@lzu.edu.cn

收稿日期: 2019-11-04; 接受日期: 2019-12-16; 网络出版日期: 2020-02-17

国家自然科学基金(编号: 11622217, 11872196, 11902130)资助

摘要 国际热核聚变试验堆(ITER)所希冀的是由管内电缆导体(CICC)绕制的超导磁体产生强磁场约束高温等离子体的运动, 进而实现可控的热核聚变. CICC导体结构复杂, 通常是由上千根NbTi/Cu或Nb₃Sn/Cu经四级或五级绞缆加工而成, 运行在极低温、大电流、强磁场复杂环境, 承受的电磁力将引起股线间产生接触挤压变形, 甚至引起股线的断裂, 给装置安全性带来隐患. 传统的CICC导体横截面股线接触力研究实验上多采用非实体的光弹模型, 数值上采用不含颗粒变形的离散单元法(Discrete Element Method, DEM), 均难以给出真实的CICC导体截面股线接触力特征. 本文实验中采用真实的CICC导体, 通过在横截面喷涂散斑的方式, 采用数字图像相关法(Digital Image Correlation, DIC), 给出了股线间的变形特征. 理论上采用颗粒单元法(Granular Element Method, GEM), 将DIC获得的股线变形作为输入参数, 直接给出了CICC导体在横向压力作用下的横截面股线接触力的分布特征, 并对接触力链大小和方向进行了统计分析.

关键词 管内电缆导体, 数字图像相关, 颗粒单元法, 接触力

PACS: 45.70.-n, 46.80.+j, 42.30.Ms

1 引言

超导磁体(也称: 托克马克)是国际热核聚变试验堆(ITER)的核心, 其主要作用是产生强磁场来约束高温等离子体的运动, 进而实现可控的热核聚变. 超导磁体多由上千根NbTi/Cu或Nb₃Sn/Cu经四级或五级绞缆加工、结构非常复杂的管内电缆导体(CICC)绕制而成. 当超导装置运行时, CICC导体处于极低温、大电流、强磁场极端环境下, 股线承受着巨大的电磁力, 这

使超导股线之间产生相互挤压变形, 甚至导致超导股线断裂, 同时影响托克马克装置的正常工作^[1-3]. 因此, 研究超导股线间的接触力行为对于超导磁体装置的安全性设计有着十分重要的意义.

近些年来, 注意到超导磁体运行过程中电磁力作用方向的唯一性, 诸多研究人员采用将CICC导体横截面内股线等效为二维的圆形颗粒的方法研究股线间的接触力. 在这种等效方式下, 兰州大学Zhu等人^[4]采用Cundall^[5]于1971年提出来的离散单元法(Discrete Ele-

引用格式: 焦帅克, 刘聪, 张兴义, 等. 管内电缆导体截面股线接触力行为分析. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2020, 50: 044602

Jiao S K, Liu C, Zhang X Y, et al. Analysis on the contact force behaviors among strands of CICC conductor cross section (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2020, 50: 044602, doi: 10.1360/SSPMA-2019-0374

ment Method, DEM), 对受电磁力挤压作用下的铌三锡股线的力学行为进行了研究, 得到了接触力的统计特征和接触角的分布方式. 这一模型, 一经提出, 就引起 ITER 国际组织的重视, 时任 ITER 国际组织磁体组负责人 Devred 安排其技术代表跟兰州大学周又和等人进行座谈, 就股线接触力行为研究深入交流. 随后, 兰州大学 Jia 等人^[6]将 DEM 从二维扩展到三维, 对超导体股线的力学特性进行了模拟研究, 预测了多级电缆的力学行为. 近年来, Cheng 等人^[7]采用光弹法对 CICC 股线进行研究, 得到了颗粒间的接触力和接触角的分布. 但是这些方法中均没有考虑到股线自身的变形, 且实验过程都没有针对真实的 CICC 结构. 因此, 如何在 CICC 真实结构中获得横截面股线接触力行为一直成为该领域所面临的一个难题.

Andrade 等人^[8]于 2012 年提出了颗粒接触力研究的颗粒单元法 (Granular Element Method, GEM). 2014 年 Hurley 等人^[9]通过 GEM 结合数字图像相关 (Digital image Correlation, DIC) 技术计算出了非透明颗粒之间的接触力. GEM 相比于 DEM, 其核心方程是牛顿力学的力平衡和力矩平衡方程, 而 DEM 选取的是牛顿第二定律作为核心方程. DEM 可开展数值模拟但开放参数过多, 如接触点的法向刚度和切向刚度以及阻尼和时间步长, 这些对于计算的准确性有很大的影响. 而 GEM 是基于实验测量给出计算需要的参数组装矩阵, 通过算法逼近精确解. GEM 相比 DEM 计算量比较小, 只有最后逼近过程中需要进行迭代运算. 另外, DEM 认为颗粒为刚性不发生形变, 而 GEM 考虑了颗粒间相互挤压产生的形变. 还有, GEM 相比于光弹模型实验而言, 对材料的要求没有那么苛刻, 可以直接对实体电缆进行分析以获得股线间的接触力.

本文以 GEM 理论为基础, 将 DIC^[10,11] 计算得到的全场应变和通过霍夫 (Hough) 变换^[12-14]得到的接触点坐标作为输入参数, 首次得到了真实的 CICC 导体在横向压力作用下的横截面股线接触力的分布特征, 并对接触力链大小和方向进行了统计分析.

2 GEM 理论基础

对于单个颗粒而言, 其受力分析如图 1 所示, 其中 $\mathbf{f}^1, \mathbf{f}^2, \mathbf{f}^{N_c^p}$ 为单个颗粒所受的外力; $\mathbf{x}^1, \mathbf{x}^2, \mathbf{x}^{N_c^p}$ 为在正交

图1 (网络版彩图) 单个颗粒的受力分析

Figure 1 (Color online) Forces on individual particle.

坐标系 $\mathbf{e}_1$ 和 $\mathbf{e}_2$ 下矢径; Ω_p 为单个颗粒的面积. 记 $\mathbf{f}^\alpha = [\mathbf{f}_1^\alpha \ \mathbf{f}_2^\alpha]^\mathrm{T}$, $\mathbf{x}^\alpha = [\mathbf{x}_1^\alpha \ \mathbf{x}_2^\alpha]^\mathrm{T}$, 根据力平衡和力矩平衡可得到方程 (1) 和 (2):

$$\sum_{\alpha=1}^{N_c^p} \mathbf{f}^\alpha = \mathbf{0}, \quad (1)$$

$$\sum_{\alpha=1}^{N_c^p} \mathbf{f}^\alpha \times \mathbf{x}^\alpha = \mathbf{0}. \quad (2)$$

假设颗粒之间都是点接触, 不存在面接触且忽略体力即颗粒自身重量的基础上, 基于弹性力学基本框架, 对于 $\forall \mathbf{x} \in \Omega_p$, 都存在如下关系:

$$\nabla \cdot \boldsymbol{\sigma} = \mathbf{0}. \quad (3)$$

同时, 又由平均应力的定义可得

$$\overline{\boldsymbol{\sigma}}^p = \frac{1}{\Omega_p} \oint_{\Omega_p} \boldsymbol{\sigma} d\Omega. \quad (4)$$

根据式 (3) 和 (4) 以及高斯散度定理和柯西应力张量得

$$\overline{\boldsymbol{\sigma}}^p = \frac{1}{\Omega_p} \sum_{\alpha=1}^{N_c^p} \text{sym}(\mathbf{f}^\alpha \otimes \mathbf{x}^\alpha). \quad (5)$$

由于两个颗粒间的接触力是排斥的, 同时假定颗粒之间没有相对滑移, 引入下面两个条件:

$$\mathbf{f}_n \geq 0, \quad (6)$$

$$|\mathbf{f}_t| \leq \mu \mathbf{f}_n, \quad (7)$$

其中规定内法线方向为正, $\mathbf{f}_n$ 为切向力, $\mathbf{f}_t$ 为法向力, μ

为颗粒间的摩擦系数.

方程(1), (2), (5)–(7)便组成了单颗粒GEM理论. 对于多颗粒系统, 本文以两个颗粒为例, 其受力和接触力分析分别如图2(a)和(b)所示, 可将上述方程拓展到整个二维颗粒系统得到式(8)–(10), 其中 $\mathbf{K}_{\text{eq}}$ 为系统力和力矩平衡方程的系数矩阵; $\mathbf{K}_{\text{st}}$ 为系统的应变和接触力关系方程的系数矩阵; $\mathbf{K}_{\text{con}}$ 为边界条件的系数矩阵.

$$\mathbf{K}_{\text{eq}} \mathbf{f} = \mathbf{0}, \quad (8)$$

$$\mathbf{K}_{\text{st}} \mathbf{f} = \mathbf{0}, \quad (9)$$

$$\mathbf{K}_{\text{con}} \mathbf{f} = \mathbf{0}. \quad (10)$$

根据图2展开式(8)–(10)得

$$\begin{matrix} & i & & j \\ \begin{matrix} p \\ q \end{matrix} & \begin{bmatrix} \ddots & 0 & \cdots & 0 & \cdots \\ 0 & \mathbf{K}_{\text{eq}}^i & 0 & \mathbf{K}_{\text{eq}}^j & 0 \\ \vdots & 0 & \ddots & 0 & \vdots \\ 0 & -\mathbf{K}_{\text{eq}}^i & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & 0 & \vdots & 0 & \ddots \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} \vdots \\ \mathbf{f}^i \\ \vdots \\ \mathbf{f}^j \\ \vdots \end{bmatrix} & = & \begin{bmatrix} \vdots \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ \vdots \end{bmatrix}, \end{matrix} \quad (11)$$

$$\begin{matrix} & i & & j \\ \begin{matrix} p \\ q \end{matrix} & \begin{bmatrix} \ddots & 0 & \cdots & 0 & \cdots \\ 0 & \mathbf{K}_{\text{st}}^i & 0 & \mathbf{K}_{\text{st}}^j & 0 \\ \vdots & 0 & \ddots & 0 & \vdots \\ 0 & -\mathbf{K}_{\text{st}}^i & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & 0 & \vdots & 0 & \ddots \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} \vdots \\ \mathbf{f}^i \\ \vdots \\ \mathbf{f}^j \\ \vdots \end{bmatrix} & = & \begin{bmatrix} \vdots \\ \mathbf{b}_{\text{st}}^p \\ \vdots \\ \mathbf{b}_{\text{st}}^q \\ \vdots \end{bmatrix}, \end{matrix} \quad (12)$$

$$\begin{matrix} & i & & j \\ \begin{matrix} i \\ j \end{matrix} & \begin{bmatrix} \ddots & 0 & \cdots & 0 & \cdots \\ 0 & \mathbf{K}_{\text{con}}^i & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & 0 & \ddots & 0 & \vdots \\ 0 & \cdots & 0 & \mathbf{K}_{\text{con}}^j & 0 \\ \vdots & 0 & \vdots & 0 & \ddots \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} \vdots \\ \mathbf{f}^i \\ \vdots \\ \mathbf{f}^j \\ \vdots \end{bmatrix} & \geq & \begin{bmatrix} \vdots \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ \vdots \end{bmatrix}, \end{matrix} \quad (13)$$

其中, $\mathbf{K}_{\text{eq}}^i$, $\mathbf{K}_{\text{st}}^i$ 和 $\mathbf{K}_{\text{con}}^i$ 以及 $\mathbf{b}_{\text{st}}^p$ 为

$$\mathbf{K}_{\text{eq}}^i = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ -\mathbf{x}_2^i & \mathbf{x}_1^i \end{pmatrix}, \quad \mathbf{K}_{\text{st}}^i = \begin{pmatrix} \mathbf{x}_1^i & 0 \\ 0 & \mathbf{x}_2^i \\ \mathbf{x}_2^i & \mathbf{x}_1^i \end{pmatrix},$$

$$\mathbf{K}_{\text{con}}^i = \begin{pmatrix} -\mathbf{n}_1^i & -\mathbf{n}_2^i \\ -\left(\mathbf{n}_1^i + \frac{1}{\mu} \mathbf{t}_1^i\right) & -\left(\mathbf{n}_2^i + \frac{1}{\mu} \mathbf{t}_2^i\right) \\ -\left(\mathbf{n}_1^i - \frac{1}{\mu} \mathbf{t}_1^i\right) & -\left(\mathbf{n}_2^i - \frac{1}{\mu} \mathbf{t}_2^i\right) \end{pmatrix},$$

图2 (网络版彩图) (a) 两个颗粒接触的受力示意图; (b) 两个颗粒间接触力的分解示意图

Figure 2 (Color online) (a) Illustration of particle-particle and particle-boundary contacts; (b) decomposition diagram of contact forces between two particles.

$$\mathbf{b}_{\text{st}}^p = \begin{pmatrix} \Omega_p \overline{\sigma}_{11} \\ \Omega_p \overline{\sigma}_{22} \\ 2\Omega_p \overline{\sigma}_{12} \end{pmatrix}.$$

3 实验

3.1 材料的选取与处理

本文选取中国科学院等离子体物理研究所自行研制CICC导体中的电缆, 横截面如图3所示. 超导电缆共由1422根超导线绞制而成, 3根股线绞制为一级缆, 3个一级缆绞制为二级缆, 以此类推, 最高通常为五级缆. 电缆由6个花瓣组成, 中心为1个氢管, 单根超导复合线(成分为: NbTi/Cu)和纯铜线的直径均为0.73 mm^[15]. 在进行实验前要对电缆截面进行喷涂散斑的预处理, 下面详细介绍本文所采用的实验过程.

为了防止在电缆切割过程中出现股线的粘连, 本文采用线切割机对电缆截面进行切割, 保证电缆截面更为平整, 且不会出现股线粘连. 随后, 对电缆截面进行散斑的喷涂, 由于股线的直径尺寸偏小, 不能采取先喷

图3 (网络版彩图) 电缆的截面图

Figure 3 (Color online) Section of the cable.

涂基底,再喷涂标记点的方法.观察发现纯铜线为深紫色,可以将其视为天然的基底,随后采用对比度较大的白色哑光漆作为标记点进行喷涂,喷涂完哑光漆后的横截面如图4所示.

将预处理后的电缆放在高分辨率的CCD相机下观察散斑的稀疏程度,如图5所示.结果显示散斑的大小和分布合理,这有利于提高计算应变的准确度.

3.2 实验平台的搭建

因为股线直径为0.73 mm左右,选取了尼康公司生产的80 mm定焦微距镜头进行拍摄.加载装置选取的是长春机械科学研究院有限公司生产的电子万能试验机,其型号为DNS10,功率为2 kW.这里需要强调,根据ITER组织已有的实验结果^[16],可知CICC在运行环境中承受的电磁力均为单向的电磁力.故本文采用横向压缩力来等效电磁力的作用,实验过程如图6所示.

图4 (网络版彩图)预处理后的电缆截面
Figure 4 (Color online) Section of the pre-treated cable.

图5 CCD相机下的电缆截面图
Figure 5 The section of cable observed by CCD camera.

图6 (网络版彩图)加载装置示意图
Figure 6 (Color online) Schematic diagram of the loading device.

通过电脑控制试验机对电缆进行加载.以1 N/s的速率单向加载到120 N,然后拍摄电缆变形前后的散斑图像,分别如图7(a)和(b)所示.

3.3 股线间的接触点识别

由于电缆实体结构比较复杂,为了尽量保证计算结果的可靠性和减少计算量,本文仅识别提取部分圆,要求提取的圆中尽量避免无接触点或者单接触点的情况.通常提取区域中最外层的圆可认定为边界,内部的圆是颗粒系统,即需要计算的圆,通过霍夫(Hough)变换提取出圆心和半径后进行画圆操作,且先通过接触判定来判断两圆是否接触,

$$(a_i - a_j)^2 + (b_i - b_j)^2 - (r_i + r_j)^2 \leq \xi^2,$$

其中, (a_i, b_i) 和 (a_j, b_j) 为两个圆的圆心坐标, r_i 和 r_j 为两个圆的半径, ξ 为阈值.如果接触再通过几何关系得到接触点的坐标,从而得到矢径 $\mathbf{x}^a$,然后对圆心和接触点进行标号,整个提取过程如图8所示.

3.4 DIC计算电缆的全场应变和平均应力

通过数字图像相关法(Digital Image Correlation, DIC)计算出图8(c)中计算区域(黑框区域)即一个瓣缆的全场应变如图9所示.结合胡克定律计算全场应力之后,需要计算每个系统圆颗粒的平均应力.由于图像处理过程中只有整像素位置上存在函数值,计算股线截面区域(圆形)中的平均应力值较为复杂,且计算量相

图7 变形前(a)和变性后(b)的散斑图

Figure 7 Undeformed (a) and deformed (b) speckle patterns.

图8 (网络版彩图) (a) 电缆横截面喷涂散斑后在CCD相机下拍摄的原始图像; (b) 二值化处理 and 边缘检测得到的轮廓图; (c) 识别整个图像的股线; (d) 识别黑色边框计算区域内(一个瓣缆)的接触点; (e) 保留系统接触点的图像

Figure 8 (Color online) (a) The original image taken by a CCD camera after spraying speckle on the cable; (b) the contour map obtained by binarization and edge detection; (c) identify all the composite strands; (d) identify the contact points between the composite strand wires in the calculation area (inside the black frame); (e) save contact points of the system.

图9 (网络版彩图) (a) 计算区域x方向的全场应变; (b) 计算区域y方向的全场应变; (c) 计算区域的全场切应变

Figure 9 (Color online) (a) Full-field strain in x direction of the calculated region; (b) full-field strain in y direction of the calculated region; (c) full-field shear strain in the calculated region.

图10 系统圆的粒径谱

Figure 10 Particle size spectrum of system circle.

对较大, 故用与股线相切的正方形区域近似代替股线的截面进行计算.

这样就可以调用图像处理中的模板匹配的方式计算平均应力值. 图10所示为系统圆的粒径谱, 可以看出

图像中大部分圆半径占54个像素, 只有一个圆半径占190个像素. 在MATLAB中使用“corr”函数进行匹配计算时需要选取一个 $2R \times 2R$ (R 为颗粒半径)像素的子模板, 但由于在DIC程序中设定的计算点步长为3个像素, 故计算得到子模板为 $(2R/3) \times (2R/3)$ ($2R/3$ 必须为奇数), 即选取的子模板为 37×37 和 127×127 . 图11所示为计算每个系统圆颗粒平均应力的流程图.

4 结果与分析

前面, 通过Hough变换和DIC技术分别得到了 $\mathbf{K}_{eq}$, $\mathbf{K}_{st}$ 和 $\mathbf{K}_{con}$ 以及 $\mathbf{b}_{st}$ 矩阵. 由于该问题从本质来说是一个反问题, 本文便借助线性规划的思想来解决这一问题, 于是这个问题就转变为一个寻求最小值解的问题. 系统方程如下所示:

$$\begin{aligned} \mathbf{f} &= \operatorname{argmin} \|\mathbf{K}_{st}\mathbf{f} - \mathbf{b}_{st}\|_2 \\ \text{s.t.} \\ \mathbf{K}_{eq}\mathbf{f} &= 0, \\ \mathbf{K}_{con}\mathbf{f} &\geq 0. \end{aligned} \quad (14)$$

图11 圆颗粒的平均应力的计算流程图

Figure 11 A flowchart for calculating the average stress of each particle.

本文所采用电缆中的超导复合股线均由铜进行了包覆, 因此计算中涉及的摩擦均是铜与铜材料之间的摩擦. 经查找相关的摩擦系数表, 可知铜与铜之间的静摩擦系数(无润滑)为0.2.

最后, 通过程序计算得到颗粒间的接触力链分

布图和接触力大小统计如图12所示. 为了尽可能清晰地图示接触力的大小特征, 本文采用以接触点到圆心连线的磅数表示力大小的方式, 如下式(15)所示:

$$F = 10 \text{ N / 磅} \times A, \quad (15)$$

其中, A 为直线的磅值. 图12(b)所示为接触力大小的统计分布, 可以看出, 在本文所选定的计算区域内, 接触力大小的分布满足近似的负指数规律, 这与文献[17]中所给出的规律相似. 另外, 通过这个统计规律可以看出, 相对于120 N的外加载荷, 大量的接触力大小位于0–50 N之间. 如果已知股线材料的许用极限及外加载荷的大小, 就可望预估出CICC导体运行过程中股线相互接触的极限作用力.

本文所要研究的另一个目的就是接触力的方向特征. 通常, 为了清晰地表示接触合力(接触压力与接触静摩擦力的合力)的方向, 规定合力与 Y 轴的正半轴沿逆时针方向组成的角为方向角 θ , 如图13(a)所示. 实验结果中方向角的平面统计图及高斯分布统计图分别如图13(b)和(c)所示. 可以看出, 方向角的分布满足近似的高斯分布, 且大多数的接触角均落在 180° – 360° 之间.

5 总结

在ITER这样的大型装置运行过程中, CICC导体在电磁力作用下的接触问题(包括接触力的大小和方向分布)一直以来是研究人员非常关注, 且亟需解决的问题. 由于CICC结构的复杂性导致这一问题研究进展相对比较缓慢. 本文实验中采用CICC导体中的真实电

图12 (网络版彩图)力链分布图(a)和接触力大小统计图(b)

Figure 12 (Color online) Distribution map of force chain (a) and statistical diagram of contact force (b).

图13 (网络版彩图) (a) 方向角的定义; (b) 方向角的分布图; (c) 方向角的高斯分布图

Figure 13 (Color online) (a) Direction angle; (b) distribution map of direction angles; (c) Gaussian distribution map of direction angles.

缆, 通过在其横截面喷涂散斑, 采用DIC方法给出电缆承受横向压缩力引起股线间的变形特征的基础上, 采用GEM模型, 将DIC获得的股线变形作为输入参数, 直接给出了CICC导体电缆(一个瓣缆)在横向力作用下的横截面股线接触力的分布特征, 并对接触力链大小

和方向进行了统计分析. 结果显示接触力的大小分布近似满足负指数分布, 而接触角分布近似满足高斯分布. 对于本文所采用的120 N的外加载荷, 较多的接触力大小落在了0–50 N之间, 同时较多方向角落在180°–360°之间.

参考文献

- 1 Lefik M J, Boso D P, Schrefler B A. Multiscale Approach for the Thermomechanical Analysis of Hierarchical Structures. In: Galvanetto U, Aliabadi M H F, eds. *Multiscale Modeling in Solid Mechanics: Computational Approaches*. London: Imperial College Press, 2015
- 2 Zhou Y H, Wang X Z. Review on some key issues related to design and fabrication of superconducting magnets in ITER (in Chinese). *Sci Sin-Phys Mech Astron*, 2013, 43: 1558–1569 [周又和, 王省哲. ITER超导磁体设计与制备中的若干关键力学问题. *中国科学: 物理学 力学 天文学*, 2013, 43: 1558–1569]
- 3 Yue D H, Zhang X Y, Zhou Y H. Research progress on the mechanical behavior of the cable in conduit conductor for the international thermonuclear experimental reactor project (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2018, 63: 396–414 [岳动华, 张兴义, 周又和. 国际热核聚变堆用管内电缆导体力学行为研究进展. *科学通报*, 2018, 63: 396–414]
- 4 Zhu J Y, Luo W, Zhou Y H, et al. Contact mechanical characteristics of Nb₃Sn strands under transverse electromagnetic loads in the CICC cross-section. *Supercond Sci Technol*, 2012, 25: 125011
- 5 Cundall P A. A computer model for simulating progressive largescale movements in blocky rock systems. In: *Proceedings of the Symposium of the International Society of Rock Mechanics*, 1971. 129–136
- 6 Jia S, Wang D, Zheng X. Numerical investigation on transverse heat transfer properties in cross section of full size Nb₃Sn CICC ITER conductor. *AIP Adv*, 2015, 5: 057124
- 7 Cheng X, Zhang X, Liu C, et al. Experimental investigation on the contact mechanical characteristics of superconducting strands in the CICC cross-section. *IEEE Trans Appl Supercond*, 2017, 27: 1–6
- 8 Andrade J E, Lim K W, Avila C F, et al. Granular element method for computational particle mechanics. *Comput Methods Appl Mech Eng*, 2012, 241–244: 262–274
- 9 Hurley R, Marteau E, Ravichandran G, et al. Extracting inter-particle forces in opaque granular materials: Beyond photoelasticity. *J Mech Phys*

Solids, 2014, 63: 154–166

- 10 Pan B, Yu L P, Wu D F. High-accuracy two-dimensional digital image correlation measurement system using a bilateral telecentric lens (in Chinese). *Acta Opt Sin*, 2013, 33: 0412004 [潘兵, 俞立平, 吴大方. 使用双远心镜头的高精度二维数字图像相关测量系统. 光学学报, 2013, 33: 0412004]
- 11 Pan B, Xie H, Yang L, et al. Accurate measurement of satellite antenna surface using 3D digital image correlation technique. *Strain*, 2009, 45: 194–200
- 12 Ye F, Chen C J, Lai Y Z, et al. Fast circle detection algorithm using sequenced Hough transform (in Chinese). *Opt Precis Eng*, 2014, 22: 1104–1111 [叶峰, 陈灿杰, 赖乙宗. 基于有序Hough变换的快速圆检测算法. 光学精密工程, 2014, 22: 1104–1111]
- 13 Zhu G Y, Zhang R L. Circle detection using Hough transform (in Chinese). *Comput Eng Design*, 2008, 6: 158–160 [朱桂英, 张瑞林. 基于Hough变换的圆检测方法. 计算机工程与设计, 2008, 6: 158–160]
- 14 Gonzalez R C, Woods R E. *Digital Image Processing* (in Chinese). 2nd ed. Ruan Q Q, translated. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2007 [冈萨雷斯, 伍兹. 数字图像处理. 第2版. 阮秋琦, 译. 北京: 电子工业出版社, 2007]
- 15 Mitchell N, Devred A, Libeyre P, et al. The ITER magnets: Design and construction status. *IEEE Trans Appl Supercond*, 2012, 22: 4200809
- 16 Devred A, Backbier I, Bessette D, et al. Challenges and status of ITER conductor production. *Supercond Sci Technol*, 2014, 27: 044001
- 17 Luo W. The Investigations on Some Mechanical-Electrical Properties of Nb₃Sn Materials and Strands (in Chinese). Dissertation for Doctoral Degree. Lanzhou: Lanzhou University, 2012 [罗威. Nb₃Sn材料及其股线的若干力学——电性能研究. 博士学位论文. 兰州: 兰州大学, 2012]

Analysis on the contact force behaviors among strands of CICC conductor cross section

JIAO ShuaiKe^{1,2}, LIU Cong^{1,2}, ZHANG XingYi^{1,2*} & ZHOU YouHe^{1,2}

¹ Key Laboratory of Mechanics on Disaster and Environmental in Western China, the Ministry of Education of China, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China;

² College of Civil Engineering and Mechanics, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China

International Thermonuclear Experimental Reactor (ITER) hopes to achieve controllable thermonuclear fusion by constraining the motion of high temperature plasma by a strong magnetic field which is generated by superconducting magnets wound by the cable-in-conduit conductors (CICCs). The CICC structure is complex, usually with thousands of NbTi/Cu or Nb₃Sn/Cu twisted in four or five stages. It operates in a complex environment of extremely low temperature, high current and strong magnetic field. The electromagnetic force generated by the superconducting material will cause deformation, reduce its characteristic parameters and bring hidden trouble to the safety of the device. Traditional studies on the contact force of the cross-section strand of CICC mostly adopt non-actual object photoelastic model in the experiment, and numerically adopt discrete element method (DEM) without particle deformation. However, it is difficult to give the contact force of the cross-section strand closer to the real working condition. In this experiment, the deformation characteristics were calculated between strands of the prototype of CICC by spraying speckle on the cross-section and using digital image correlation (DIC). Theoretically, taking the strand deformation obtained by DIC as the input parameter of granular element method (GEM), the distribution characteristics of the contact force of the CICC conductor under the action of transverse pressure are calculated, and the size and direction of the contact force chain are statistically analyzed.

cable-in-conduit conductor (CICC), digital image correlation (DIC), granular element method (GEM), contact force

PACS: 45.70.-n, 46.80.+j, 42.30.Ms

doi: [10.1360/SSPMA-2019-0374](https://doi.org/10.1360/SSPMA-2019-0374)