

基于有限质点法的牵引走板与双滑车多体动力计算方法^{*}

秦剑^{1†} 江明¹ 景文川² 贾宁¹ 李刚²

(1. 中国电力科学研究院有限公司, 北京 100055)(2. 国网四川电力送变电建设有限公司, 成都 610051)

摘要 根据输电线路张力放线施工中牵引走板与放线滑车的实际接触运动关系, 构建了由钢丝绳、牵引走板、导线及双滑车等部件组成的多体运动系统, 提出了符合实际情况的钢丝绳、导线、牵引走板等与双滑车的接触判断方法. 基于有限质点法理论, 结合部件间的空间位置关系, 给出了单元节点的作用力表达式, 并通过罚函数法给出了不同接触状态下牵引走板对滑车的接触力, 形成了可分析牵引走板与双滑车结构接触碰撞的动力计算方法. 根据张力放线施工实际情况, 计算分析了牵引走板与双滑车结构接触过程中的滑车载荷、摆动角度的变化, 并针对悬挂长度、走板厚度等施工因素, 总结了牵引力、最大接触力、滑车载荷、摆动幅度等参数对系统安全的影响. 本文提出的计算方法可指导工程中牵引走板与滑车的结构设计及施工安装, 为输电线路放线施工提供技术参考.

关键词 张力放线, 牵引走板, 双滑车, 有限质点法, 接触力

DOI: 10.6052/1672-6553-2021-002

引言

牵引走板是输电线路工程张力放线施工中用于连接牵引钢丝绳和各子导线的专用工具, 有一牵二、一牵四、一牵六等不同型式. 走板由钢板焊接而成, 由牵引钢丝绳带动, 牵引导线通过输电线路铁塔上的各个放线滑车. 当线路铁塔间的转角、高差较大时, 需悬挂双放线滑车, 增加滑车承载能力, 减小导线对滑车的包络角^[1,2].

随着特高压工程建设的开展, 大截面导线普遍应用, 牵引走板质量、体积也不断增加, 在冲击力的作用下对滑车和导线会产生一定损伤, 严重时会发生滑车破损而导致放线事故, 造成较大的经济损失. 因此牵引走板、放线滑车的设计与安装成为特高压工程放线施工中关注的重点^[3-5]. 目前, 张力放线过程中牵引走板与滑车的接触冲击过程尚未开展相关研究, 缺少滑车所受冲击载荷、滑车悬挂摆动等施工关键因素的计算分析方法, 对双滑车结构的理论研究更属空白.

有限质点法以向量力学和数值计算为基础, 将

结构离散为质点群, 采用牛顿第二定律描述这些质点的运动, 避免求解非线性方程组和整体刚度矩阵, 适于计算发生刚体位移和几何大变形的结构, 在处理结构大变形、接触、碰撞等非线性问题方面取得良好的应用效果^[6-8]. 在结构接触计算方法中, Lagrange 乘子法精度较高, 但增加了未知量数目^[9], 而罚函数法以接触刚度系数与界面侵入量的乘积作为接触力, 使无穿透的约束条件近似得到满足^[10-12], 计算方便且不增加方程数量, 在多体系统碰撞计算中获得了广泛的应用. 俞锋等^[13]结合罚函数法采用有限质点法对索与滑轮接触进行分析, 张鹏飞等^[14]针对杆、板等结构提出了接触力的简化计算方法, 秦剑等^[15]对索道载荷过鞍座冲击的影响进行了深入计算.

本文在有限质点法的基础上提出牵引走板与双放线滑车系统的动力计算方法, 分析牵引走板与双放线滑车在接触下的作用影响, 为张力放线施工安全提供技术参考.

2020-11-24 收到第 1 稿, 2020-12-25 收到修改稿.

^{*} 国网公司科技项目(5200-201955119A-0-0-00)

[†] 通讯作者 E-mail: mecmath@126.com

1 牵引走板与放线滑车运动系统

在牵引机的牵引力及张力机的张力作用下,钢丝绳、牵引走板及导线连续通过线路中各个铁塔横担下悬挂的放线滑车(组),直至放线过程结束.如图1所示.



图1 牵引走板通过滑车

Fig.1 Traction plate passing through the pulley

1.1 多体系统位置

将牵引钢丝绳、牵引走板、导线及双滑车、滑车悬臂、滑车连接杆看作由多个部件组成的多体运动系统.放线滑车悬挂在铁塔横担上,悬挂点 J_1 、 J_2 ,并以 J_1 为原点建立平面坐标系,如图2所示.牵引绳(AB)、牵引走板(BC)、导线(CD)依次通过以 O_1 、 O_2 为中心的滑车.放线滑车在悬臂的作用下绕悬挂点 J_1 、 J_2 发生前后摆动.牵引方向及张力方向由放线整体工况确定,并在运动过程中保持不变.

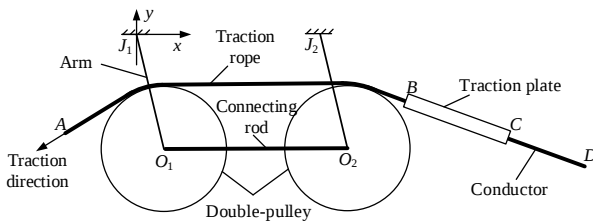


图2 牵引走板与双滑车运动系统

Fig.2 An illustrative system of traction plate and double-pulley

1.2 系统单元及节点

在牵引力与张力的作用下,牵引绳、导线可视为柔性的线弹性单元,仅承受轴向拉力,运动过程中弹性模量及截面积保持不变.因此设置牵引绳单元 AB ,单元初始长度为 s_{AB} ,弹性模量与截面积乘积为 EA_B .导线单元 CD ,单元初始长度为 s_{CD} ,弹性模量与截面积乘积为 EA_C .牵引走板为钢制,在接触过程中无变形,视为矩形刚性单元,单元长度为 s_{BC} ,厚度为 b_p ,走板与钢丝绳、导线连接节点 B 、 C 位于单元轴心线,下部顶点为 P 、 Q ,如图3所示.

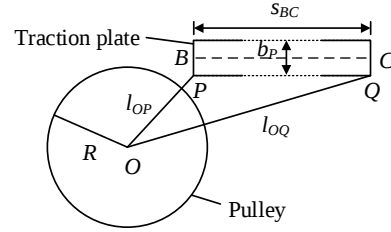


图3 走板与滑车示意图

Fig.3 Schematic diagram of traction plate and pulley

悬挂单元 O_1J_1 、 O_2J_2 的初始长度为 s_{0j} (在此认为2个悬挂单元长度相同),弹性模量与截面积乘积为 EA_j .双滑车为完全相同的圆形刚性单元,中心为 O_1 、 O_2 (下文中以 O_1 、 O_2 表示2个滑车),半径为 R .双滑车间隔单元 O_1O_2 ,单元初始长度为 s_{00} ,弹性模量与截面积乘积为 EA_0 .将单元质量均匀集中于质点 B 、 C 、 D 、 O_1 、 O_2 上,则各质点质量为:

$$\begin{aligned} m_B &= \rho_R \cdot s_{AB} / 2 + m_p / 2 \\ m_C &= \rho_C \cdot s_{CD} / 2 + m_p / 2 \\ m_D &= \rho_C \cdot s_{CD} / 2 \\ m_{O_1} &= \rho_j \cdot s_{0j} / 2 + m_k \end{aligned} \quad (1)$$

式中, ρ_R 、 ρ_C 、 ρ_j 分别为牵引绳、导线、悬挂单元的单位长度质量; m_p 、 m_k 分别为牵引走板、滑车质量.

1.3 牵引绳、导线与滑车的接触

在实际中,牵引绳、导线只会与滑车的上部(高于中心 O_1 、 O_2 的部分)发生接触,因此为简化分析,从牵引绳、导线与滑车上部的接触点入手判断接触情况.节点 A 到滑车 O_1 、 O_2 上部的切点为 A_1 、 A_2 ,节点 B 到滑车 O_1 、 O_2 上部的切点为 B_1 、 B_2 ,滑车 O_1 、 O_2 的上部外切线切点为 U_1 、 U_2 ,如图4所示.以单元 AB 对滑车的切点水平位置判断对滑车的包络角,并获得单元 AB 在接触后的长度.

(1)当 AB 与滑车 O_1 、 O_2 同时接触,如图4(a)所示, AB 的长度可表示为

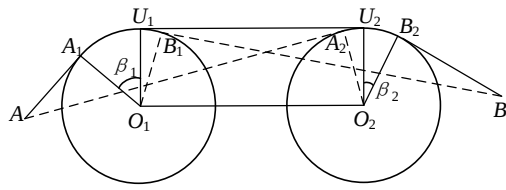
$$S_{AB} = \sqrt{l_{O_1A}^2 - R^2} + \beta_1 R + l_{U_1U_2} + \beta_2 R + \sqrt{l_{O_2B}^2 - R^2} \quad (2)$$

其中, β_1 、 β_2 为 AB 对滑车 O_1 、 O_2 的包络角, $\beta_1 = \arccos(1 - l_{A_1U_1}^2 / 2R^2)$, $\beta_2 = \arccos(1 - l_{U_2B_2}^2 / 2R^2)$; l_{O_1A} 、 $l_{U_1U_2}$ 、 l_{O_2B} 、 $l_{A_1U_1}$ 、 $l_{U_2B_2}$ 分别为 O_1 到 A 、 U_1 到 U_2 、 O_2 到 B 、 A_1 到 U_1 、 U_2 到 B_2 的距离.

(2)当 AB 仅与滑车 O_1 接触,如图4(b)所示, AB 的长度可表示为

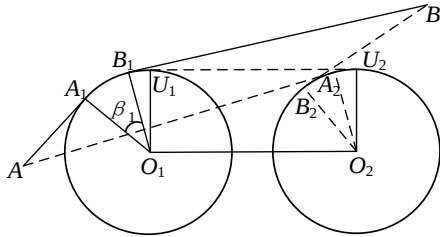
$$S_{AB} = \sqrt{l_{O_1A}^2 - R^2} + \beta_2 R + \sqrt{l_{O_1B}^2 - R^2} \quad (3)$$

其中, $\beta_2 = \arccos(1 - l_{A_1B_1}^2 / 2R^2)$; l_{O_1B} 、 $l_{A_1B_1}$ 分别为 O_1 到



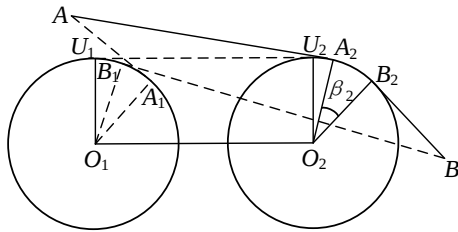
(a) AB 与双滑车同时接触

(a) AB is contacted with two pulleys simultaneously



(b) AB 与滑车 O1 接触

(b) AB is contacted with pulley O1



(c) AB 与滑车 O2 接触

(c) AB is contacted with pulley O2

图4 AB 与双滑车接触状态

Fig.4 AB is contacted with two pulleys

B 、 A_1 到 B_1 的距离.

(3)当 AB 仅与滑车 O_2 接触,如图4(c)所示, AB 的长度可表示为

$$S_{AB} = \sqrt{l_{AO2}^2 - R^2} + \beta_2 R + \sqrt{l_{O2B}^2 - R^2} \quad (4)$$

其中, $\beta_2 = \arccos(1 - l_{A2B2}^2/2R^2)$; l_{AO2} 、 l_{A2B2} 分别为 A_1 到 O_2 、 A_2 到 B_2 的距离.

(4)其他情况下 AB 与滑车 O_1 、 O_2 不接触.单元 AB 的长度 S_{AB} 为 A 、 B 的距离 l_{AB} .

导线 CD 与滑车的接触判断可按上述方法实现,仅需将 A 、 B 替换为 C 、 D 即可.

1.4 牵引走板与滑车的接触

牵引走板 BC 在运动体系中为刚性体,与滑车接触过程中不发生弯曲变形,牵引走板下部边界 PQ 与滑车 O_1 、 O_2 接触.因此可以通过直线 PQ 与滑车的关系判断接触情况.如图5所示,图中①~③表示不同的接触状态.首先判断牵引走板与滑车 O_1 的接触关系:

(1)当 $l_{O1P} \leq R$,且 $l_{O1Q} \geq \sqrt{R^2 + s_{BC}^2}$,滑车 O_1 与 P 点

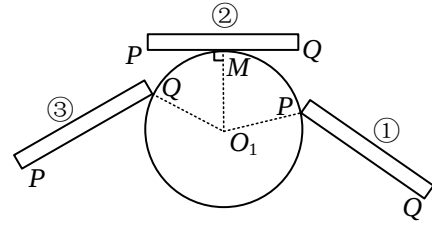


图5 牵引走板与滑车接触

Fig.5 Traction plate is contacted with the pulley

发生点接触.

(2)当 $R \leq l_{O1P} < \sqrt{R^2 + s_{BC}^2}$,且 $R \leq l_{O1Q} < \sqrt{R^2 + s_{BC}^2}$,滑车 O_1 与 PQ 发生区域接触,接触区域的中点为 M .

(3)当 $l_{O1P} \geq \sqrt{R^2 + s_{BC}^2}$,且 $l_{O1Q} \leq R$,滑车 O_1 与 Q 点发生点接触.

其中, l_{O1P} 、 l_{O1Q} 分别为 O_1 到 P 、 O_1 到 Q 的距离.其他情形下走板与滑车 O_1 无接触.走板与滑车 O_2 的接触判断与 O_1 相同,仅需将 O_1 替换为 O_2 即可,不再赘述.

2 多体运动系统动力计算方法

2.1 有限质点法

在此采用有限质点法分析牵引走板与放线滑车多体系统的运动.系统中各单元的变形通过具有集中质量的质点位移表示,质点在单元内力和节点外力的共同作用下遵循牛顿第二定律进行运动.质点运动方程可表示为

$$m\ddot{\mathbf{x}} = \mathbf{F} \quad (5)$$

式中, m 为质点质量; $\ddot{\mathbf{x}}$ 为质点加速度矢量; $\mathbf{F}$ 为质点所受合力矢量.采用中心差分法来求解质点的运动方程.令 h 为时间增量步长,节点运动时间 $t_n = nh$, $n \geq 0$; $\mathbf{x}^{n-1}$ 、 $\mathbf{x}^n$ 和 $\mathbf{x}^{n+1}$ 分别为第 $n-1$ 、 n 和 $n+1$ 个时间步的质点位置向量, $\mathbf{F}^n$ 为第 n 个时间步的质点合力矢量.考虑结构阻尼影响,引入阻尼系数 ζ ,由中心差分公式得到第 $n+1$ 步的质点位置向量:

$$\mathbf{x}^{n+1} = \frac{1}{c_1} (2\mathbf{x}^n - c_2 \mathbf{x}^{n-1} + \frac{h^2}{m} \mathbf{F}^n) \quad (6)$$

式中, $c_1 = 1 + \zeta h/2$, $c_2 = 1 - \zeta h/2$.

2.2 质点作用力

(1)牵引绳、导线对质点的作用力

牵引绳 AB 与滑车发生柔性接触,线弹性单元 AB 内力可表示为

$$f_1 = EA_c \frac{S_{AB} - s_{AB}}{s_{AB}} \quad (7)$$

单元 AB 对质点 A 、 B 、 O_1 、 O_2 的作用力 $\mathbf{f}_{AB-A}$ 、 $\mathbf{f}_{AB-B}$ 、 $\mathbf{f}_{AB-O1}$ 、

$\mathbf{f}_{AB-O2}$ 表达式可根据牵引绳与滑车的不同接触状态(图4)得到,具体如表1所示.

表1 不同接触状态下的牵引绳对质点作用力

Table1 Force exerted by traction rope on the particles under different contact conditions

Force	Contact with O_1 and O_2	Contact with O_1	Contact with O_2	No contact
$\mathbf{f}_{AB-A}$	$f_1 \mathbf{e}_{AA1}$	$f_1 \mathbf{e}_{AA1}$	$f_1 \mathbf{e}_{AA2}$	$f_1 \mathbf{e}_{AB}$
$\mathbf{f}_{AB-B}$	$f_1 \mathbf{e}_{BB2}$	$f_1 \mathbf{e}_{BB1}$	$f_1 \mathbf{e}_{BB2}$	$f_1 \mathbf{e}_{BA}$
$\mathbf{f}_{AB-O1}$	$f_1(\mathbf{e}_{A1A} + \mathbf{e}_{O1O2})$	$f_1(\mathbf{e}_{A1A} + \mathbf{e}_{B1B})$	$\mathbf{0}$	$\mathbf{0}$
$\mathbf{f}_{AB-O2}$	$f_1(\mathbf{e}_{O2O1} + \mathbf{e}_{B2B})$	$\mathbf{0}$	$f_1(\mathbf{e}_{A2A} + \mathbf{e}_{B2B})$	$\mathbf{0}$

为简化叙述,以 $\mathbf{e}$ 表示单位向量,下标表示向量方向,即 $\mathbf{e}_{AA1}$ 表示从A到 A_1 的单位向量.其他向量采用同样的表示方法,不再一一说明.同样可以得到单元CD对C、D、 O_1 、 O_2 的作用力 $\mathbf{f}_{CD-C}$ 、 $\mathbf{f}_{CD-D}$ 、 $\mathbf{f}_{CD-O1}$ 、 $\mathbf{f}_{CD-O2}$.

(2) 牵引走板对质点的作用力

走板与滑车 O_1 、 O_2 先后发生碰撞接触,其法向接触力等于侵入量与法向刚度系数的乘积^[13],因滑车在接触过程中发生转动而忽略摩擦接触力.当走板的P点与滑车 O_1 发生点接触时(图6),走板对滑车的侵入量为 $R-l_{O1P}$,则单元BC对质点 O_1 的作用力可表示

$$\mathbf{f}_{BC-O1} = k(R-l_{O1P}) \mathbf{e}_{PO1} \quad (8)$$

其中 k 为法向刚度系数(可取值 10^6).当PQ与滑车 O_1 发生线接触时,最大侵入点M,侵入量为 $R-l_{O1M}$,则单元BC对 O_1 的作用力可表示

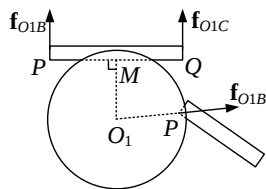


图6 牵引走板与滑车接触

Fig.6 Contact force between traction plate and pulley

$$\mathbf{f}_{BC-O1} = k(R-l_{O1M}) \mathbf{e}_{MO1} \quad (9)$$

其中 l_{O1M} 为 O_1 到直线PQ的距离,可根据三角形 O_1PQ 的面积关系得到:

$$l_{O1M} = \frac{2}{s_{BC}} \sqrt{l_0(l_0 - l_{O1P})(l_0 - l_{O1Q})(l_0 - s_{BC})} \quad (10)$$

式中 $l_0 = (l_{O1P} + l_{O1Q} + s_{BC})/2$.同样,当Q点与滑车 O_1 发生点接触时,侵入量为 $R-l_{O1Q}$,则单元BC对 O_1 的作用力为

$$\mathbf{f}_{BC-O1} = k(R-l_{O1Q}) \mathbf{e}_{QO1} \quad (11)$$

当不发生接触时, $\mathbf{f}_{BC-O1} = \mathbf{0}$.走板为刚性体,与滑车的接触也对走板产生反作用力.由于走板厚度较小,认为滑车对走板的作用力直接作用于B、C.根据最大侵入点与端点B、C的相对位置,将接触力按比例分配到走板端点上,则滑车 O_1 对质点B、C的作用力可表示

$$\mathbf{f}_{O1B} = -(1-\lambda) \mathbf{f}_{BC-O1} \quad (12)$$

$$\mathbf{f}_{O1C} = -\lambda \mathbf{f}_{BC-O1} \quad (13)$$

式中 $\lambda = l/s_{BC} \sqrt{l_{O1P}^2 - l_{O1M}^2}$.同样可得到牵引走板与滑车 O_2 的接触力 $\mathbf{f}_{BC-O2}$ 及 O_2 对B、C的作用力 $\mathbf{f}_{O2B}$ 、 $\mathbf{f}_{O2C}$.走板为刚性体,在任意时刻应满足长度约束条件:

$$|\mathbf{x}_B - \mathbf{x}_C| - s_{BC} = 0 \quad (14)$$

已知 t_n 时刻的位移,将 t_{n+1} 的B、C位移表达式(6)代入式(14),即可得到 t_n 的单元BC内力 f_2 ,则单元BC对质点B、C的作用力可表示为

$$\mathbf{f}_{BC-B} = f_2 \mathbf{e}_{BC} \quad (15)$$

$$\mathbf{f}_{BC-C} = f_2 \mathbf{e}_{CB} \quad (16)$$

(3) 悬挂单元、滑车间隔单元对质点的作用力

悬挂单元 O_1J_1 、 O_2J_2 和间隔单元 O_1O_2 均为线弹性单元,单元内力分别可根据单元变形得到:

$$f_3 = EA_s \frac{1}{s_{OJ}} (l_{O1J1} - s_{OJ})$$

$$f_4 = EA_s \frac{1}{s_{OJ}} (l_{O2J2} - s_{OJ}) \quad (17)$$

$$f_5 = EA_o \frac{1}{s_{OO}} (l_{O1O2} - s_{OO})$$

因此,单元 O_1J_1 对质点 O_1 的作用力、 O_2J_2 对 O_2 的作用力、 O_1O_2 对质点 O_1 、 O_2 的作用力分别为:

$$\mathbf{f}_{O1J1-O1} = f_3 \mathbf{e}_{O1J1} \quad (18)$$

$$\mathbf{f}_{O2J2-O2} = f_4 \mathbf{e}_{O2J2} \quad (19)$$

$$\mathbf{f}_{O1O2-O1} = f_5 \mathbf{e}_{O2O1} = -\mathbf{f}_{O1O2-O2} \quad (20)$$

(4) 质点所受合力

已知当前时刻 t^n 的质点A、B、C、D、 O_1 、 O_2 坐标,可得到各质点所受作用力,进而得到各质点所受合力 $\mathbf{F}_B^n$ 、 $\mathbf{F}_B^n$ 、 $\mathbf{F}_C^n$ 、 $\mathbf{F}_D^n$ 、 $\mathbf{F}_{O1}^n$ 、 $\mathbf{F}_{O2}^n$,如表2所示.表中, $\mathbf{G}$ 为重力加速度矢量, $\mathbf{T}_c$ 为导线的施工张力矢量.在此对质点A施加移动位移边界条件,因此表中未列出该节点载荷.

2.3 系统运动过程计算

质点A在牵引力的作用下,向牵引侧运动,在放线过程中维持恒定速度 $\mathbf{v}_A$,则

$$\mathbf{x}_A^{n+1} = \mathbf{x}_A^n + \mathbf{h} \cdot \mathbf{v}_A \quad (21)$$

通过张力放线施工整体计算^[16],确定 $\mathbf{v}_A$ 及张力矢量 $\mathbf{T}_c$.在得到 t_n 时的质点位移后,即可计算得到各单元

表2 各质点所受作用力
Table2 Forces on the particles

Element	<i>B</i>	<i>C</i>	<i>D</i>	<i>O</i> ₁	<i>O</i> ₂
<i>AB</i>	<i>f</i> _{<i>AB-B</i>}	/	/	<i>f</i> _{<i>AB-O1</i>}	<i>f</i> _{<i>AB-O2</i>}
<i>BC</i>	<i>f</i> _{<i>BC-B</i>}	<i>f</i> _{<i>BC-C</i>}	/	<i>f</i> _{<i>BC-O1</i>}	<i>f</i> _{<i>BC-O2</i>}
<i>CD</i>	/	<i>f</i> _{<i>CD-C</i>}	<i>f</i> _{<i>CD-D</i>}	<i>f</i> _{<i>CD-O1</i>}	<i>f</i> _{<i>CD-O2</i>}
<i>O</i> ₁ <i>J</i> ₁	<i>f</i> _{<i>O1B</i>}	<i>f</i> _{<i>O1C</i>}	/	<i>f</i> _{<i>O1J1-O1</i>}	/
<i>O</i> ₂ <i>J</i> ₂	<i>f</i> _{<i>O2B</i>}	<i>f</i> _{<i>O2C</i>}	/	/	<i>f</i> _{<i>O2J2-O2</i>}
<i>O</i> ₁ <i>O</i> ₂	/	/	/	<i>f</i> _{<i>O1O2-O1</i>}	<i>f</i> _{<i>O1O2-O2</i>}
External force	<i>m</i> _{<i>B</i>} <i>G</i>	<i>m</i> _{<i>C</i>} <i>G</i>	<i>m</i> _{<i>D</i>} <i>G</i> + <i>T</i> _{<i>C</i>}	<i>m</i> ₀ <i>G</i>	<i>m</i> ₀ <i>G</i>
Resultant force	<i>F</i> ^{<i>n</i>} _{<i>B</i>}	<i>F</i> ^{<i>n</i>} _{<i>C</i>}	<i>F</i> ^{<i>n</i>} _{<i>D</i>}	<i>F</i> ^{<i>n</i>} _{<i>O1</i>}	<i>F</i> ^{<i>n</i>} _{<i>O2</i>}

内力,进而得到各质点所受作用力.根据式(6)可获得 t_{n+1} 时的质点位移,直至运动过程结束.

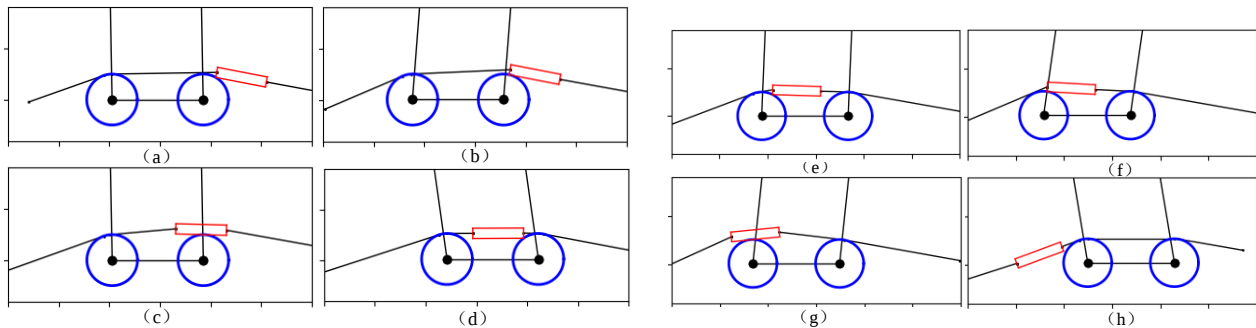


图7 牵引走板通过双滑车全过程

Fig.7 The whole process of traction plate passing through the double-pulley

施工中主要关注滑车所受最大载荷,因此针对滑车所承载荷与滑车摆动角度进行分析,计算结果如图8所示.从图8(a)可知,走板与双滑车经历了无接触—与滑车2接触(从*P*到*Q*)—脱离接触—与滑车1接触(从*P*到*Q*)—脱离接触的过程.图中,①:走板与滑车2未接触;②:走板前端与滑车2点接触;③:走板与滑车2线接触;④:走板末端与滑车2点接触;⑤:走板与滑车2脱离;⑥:走板前端与滑车1点接触;⑦:走板与滑车1线接触;⑧:走板末端与滑车1点接触;⑨:走板与滑车1脱离.整个过程中滑车1的最大悬挂载荷发生在阶段⑦,滑车2的最大载荷发生在阶段③.如图8(b)可知,当走板与滑车1发生线接触时,滑车向牵引方向的摆动角达到最大;走板与滑车1脱离接触时,滑车向张力方向的摆动角达到最大.

通过计算发现牵引走板厚度和滑车悬挂长度对滑车载荷有较大影响,因此设置典型工况2:走板厚度0.3m、悬挂长度4m,其他参数与典型工况1相同.滑车载荷、滑车摆动角度结果如图9所示.从

3 牵引走板与放线滑车接触计算分析

根据特高压工程中张力放线施工的典型技术参数,开展牵引走板通过双放线滑车的运动过程计算,分析施工中重点因素对滑车载荷、摆动角等参数的影响.

3.1 接触动力过程分析

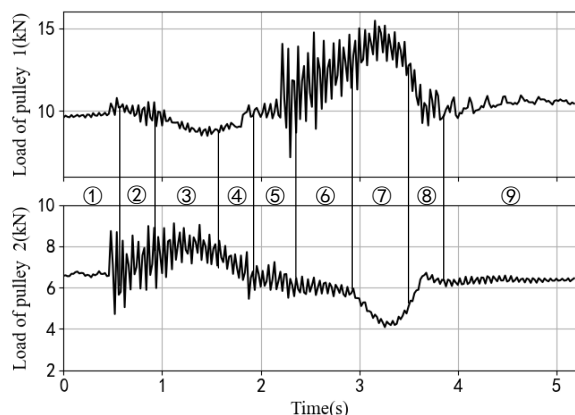
典型工况1:走板通过滑车时运行速度1.0m/s、牵引角度20°(牵引方向与水平的夹角)、张力角度-10°(张力方向与水平的夹角)、张力25kN、走板厚度0.1m、悬挂长度(s_{oj})1.0m.计算中,参数 $\zeta=0.2$, $h=10^{-4}$,运动过程时间*t*=5.2s.走板通过双滑车的过程如图7(a)~(h)所示.

图9(a)可知,走板经历了无接触—与滑车2接触(从*P*到*Q*)—与滑车2、滑车1反复脱离、接触—与滑车1接触(从*P*到*Q*)—脱离接触的变化过程.其中,①~④的状态与典型工况1相同;⑤~⑥为走板与滑车1、滑车2反复脱离、接触阶段;⑦~⑩与典型工况2的⑥—⑩状态相同.

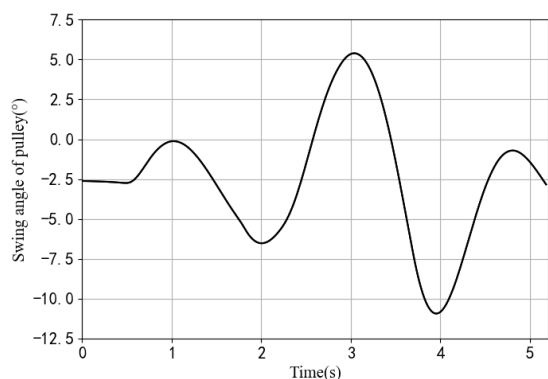
滑车的摆动角度与典型工况1近似,在中期因走板与滑车1、2的反复脱离、接触而有波动.从典型工况1、2结果中可知,随着放线滑车悬挂长度增大和走板厚度增加,走板通过双滑车的运行状态发生了复杂变化,产生了与滑车1和滑车2反复接触的变化过程,滑车载荷、摆动角度也有大幅增大.

3.2 重要因素的影响分析

特高压输电线路工程中,受实际条件影响,施工安装中滑车的悬挂长度有较大变化;另外牵引走板通过滑车时因空间位置不同而呈现不同厚度变化.因此分别计算悬挂长度3.0m~4.5m,走板厚度在0.1m、0.2m情况下,走板牵引力、走板与滑车的最大接触力、悬臂载荷、摆动幅度(向牵引侧摆动为



(a)滑车1与滑车2所受载荷随时间变化曲线
(a)Time history of loads on pulley 1 and pulley 2



(b)摆动角随时间变化曲线
(b)Time history of swing angle

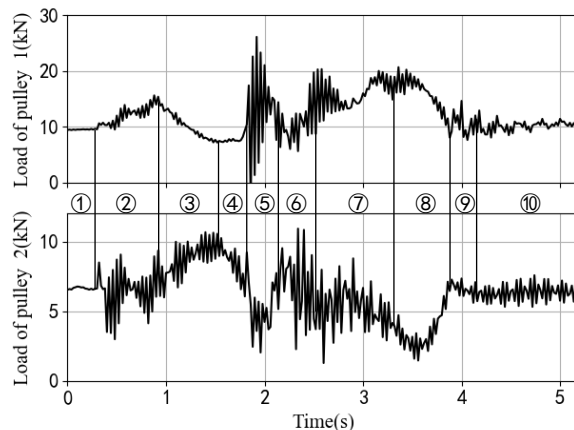
图8 走板通过双滑车过程分析(典型工况1)

Fig.8 Process analysis of traction plate passing through double-pulley (typical condition 1)

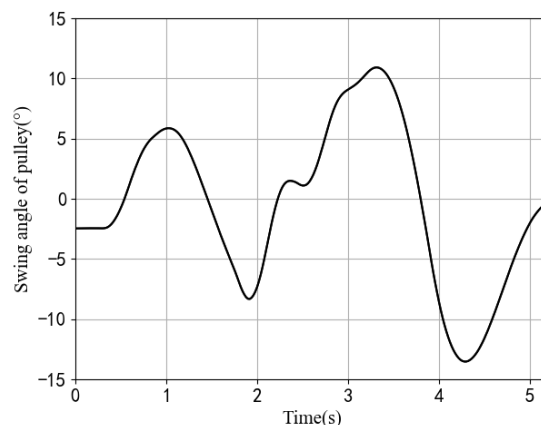
正,向张力侧摆动为负)等参数的变化.计算结果如图10~图12所示.从图10~图12可知,走板通过双滑车过程中:1)随着悬挂长度的增加,滑车摆动幅度不断减小;2)随悬挂长度的增加,牵引力、最大接触力、滑车载荷产生波动,其变化与运动中的接触状态有一定关系;3)走板厚度对各变量影响较大,厚度0.2m时,牵引力、最大接触力、滑车载荷、摆动幅度与厚度0.1m相比均有较大增长.

4 结论

本文建立了输电线路张力放线施工中牵引走板与双滑车结构的多体运动系统,提出了运动系统中钢丝绳、导线、牵引走板与双滑车间的接触判别方法,通过罚函数法得到牵引走板与滑车的接触力,结合有限质点法形成了牵引走板与双滑车的碰撞接触计算方法,为输电线路工程施工提供了技术



(a)滑车1与滑车2所受载荷随时间变化曲线
(a)Time history of loads on pulley 1 and pulley 2



(b)摆动角随时间变化曲线
(b)Time history of swing angle

图9 走板通过双滑车过程分析(典型工况2)

Fig.9 Process analysis of traction plate passing through double-pulley (typical condition 2)

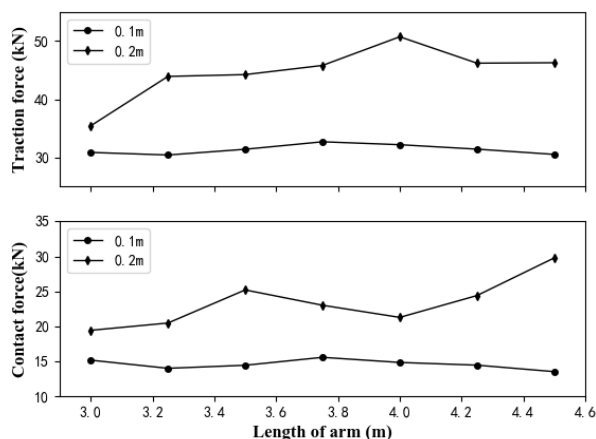


图10 牵引力、接触力随悬挂长度的变化曲线

Fig.10 Curve of traction force and contact force with varying suspension length

支持,可用于大高差、大转角等地形条件下牵引走板对双滑车通过性的精细计算.通过模型简化,可

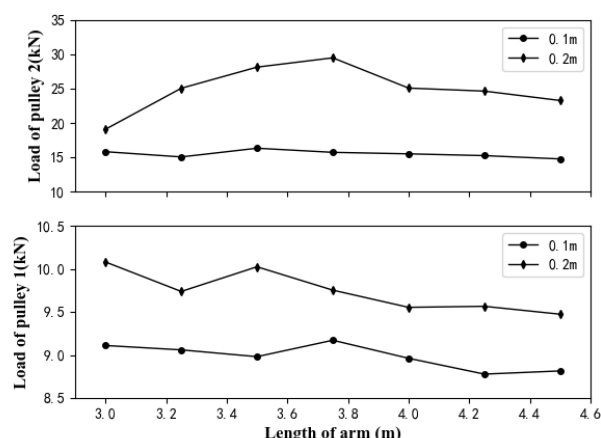


图11 滑车1、2载荷随悬挂长度的变化曲线

Fig.11 Curve of loads of pulley 1 and 2 with varying suspension length

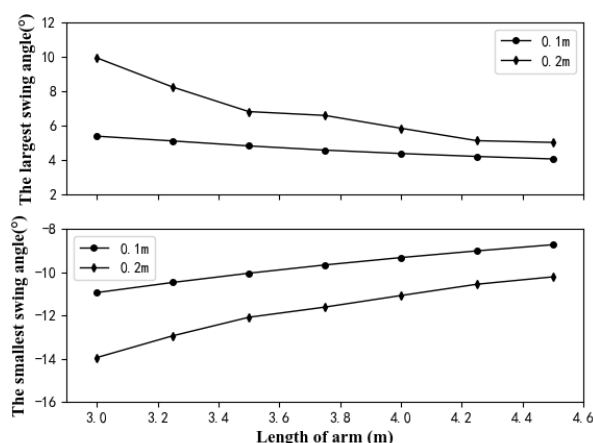


图12 滑车摆动角最大幅值随悬挂长度的变化曲线

Fig.12 Curve of maximum amplitude of pulley swing angle with varying suspension length

直接退化得到牵引走板与单滑车的接触计算方法。

针对输电线路施工中的典型工况,进行了牵引走板与滑车的接触过程分析,总结了运动过程中接触状态、滑车载荷、滑车摆动角度的变化规律。针对工程中关注的悬挂长度、走板厚度等因素,进行多个工况的走板过双滑车过程计算,分析了牵引力、最大接触力、滑车载荷、摆动幅度等主要影响参数的变化。计算分析结果为牵引走板、放线滑车的设计与施工安装提供了参考依据,为张力放线施工安全提供保障。

参 考 文 献

- 孟丽娟. 输电线路张力架线施工技术探讨. 电源技术应用, 2013, 12: 11~13 (Meng L J. Discussion on tension stringing construction technology of transmission line. *Application of Power Supply Technology*, 2013, 12: 11~13)

- (in Chinese))
- 徐守琦, 金连勇, 孟昭清. 二牵六放线施工工艺的实施. 电力建设, 2010, 31(8): 38~42 (Xu S Q, Jin L Y, Meng Z Q. The implementation of two-drag-six construction technology. *Electric Power Construction*, 2010, 31(8): 38~42 (in Chinese))
- 季伟. 对输电线路牵引绳走板施工可行性的探讨. 华东科技(学术版), 2012, 12(1): 315 (Ji W. Discussion on construction feasibility of traction rope walking plate of transmission line. *East China Science & Technology*, 2012, 12(1): 315 (in Chinese))
- 徐守琦, 刘凯, 易明阳. 特高压双牵引走板的研制. 电力建设, 2010, 31(3): 102~105 (Xu S Q, Liu K, Yi M Y. Development of UHV double-towing-walking-plate. *Electric Power Construction*, 2010, 31(3): 102~105 (in Chinese))
- 汤良友, 鲁飞. ±800kV 特高压直流输电线路张力架线滑车悬挂施工工艺. 电力建设, 2011, 32(4): 121~124 (Tang L Y, Lu F. Construction techniques of tension stringing pulley hanging for the ±800 kV UHVDC transmission line. *Electric Power Construction*, 2011, 32(4): 121~124 (in Chinese))
- 罗尧治, 郑延丰, 杨超等. 结构复杂行为分析的有限质点法研究综述. 工程力学, 2014, 31(8): 1~7 (Luo Y Z, Zheng Y F, Yang C, et al. Review of the finite particle method for complex behaviors of structures. *Engineering Mechanics*, 2014, 31(8): 1~7 (in Chinese))
- 赵阳, 彭涛, 王震. 基于向量式有限元的索杆张力结构施工成形分析. 土木工程学报, 2013, 46(5): 13~21 (Zhao Y, Peng T, Wang Z. Construction analysis of cable-strut tensile structures based on vector form intrinsic finite element. *China Civil Engineering Journal*, 2013, 46(5): 13~21 (in Chinese))
- Wu T Y. Dynamic nonlinear analysis of shell structures using a vector form intrinsic finite element. *Engineering Structures*, 2013, 56(6): 2028~2040
- 梁立孚, 郭庆勇. 非保守非线性刚-热-弹耦合动力学的 Lagrange 方程. 动力学与控制学报, 2019, 17(5): 487~496 (Liang L F, Guo Q Y. The Lagrange equation of non conservative non-linear rigid-thermo-elastic coupling dynamics. *Journal of Dynamics and Control*, 2019, 17(5): 487~496 (in Chinese))
- 华卫江, 章定国. 柔性机器人系统碰撞动力学建模. 机械工程学报, 2008, 43(12): 222~228 (Hua W J, Zhang D G. Modeling of impact dynamics of flexible robots. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2008, 43(12): 222~228 (in Chinese))
- 董富祥, 洪嘉振. 平面柔性多体系统正碰撞动力学建模理论研究. 计算力学学报, 2010, 27(6): 1042~1048

- (Dong F X, Hong J Z. Study on the modeling theory of the normal impact dynamics for the planar flexible multibody system. *Chinese Journal of Computational Mechanics*, 2010, 27(6): 1042~1048(in Chinese))
- 12 Zheng J, An X, Huang M. GPU-based parallel algorithm for particle contact detection and its application in self-compacting concrete flow simulations. *Computers & Structures*, 2012, 112-113(DEC.): 193~204
 - 13 俞锋, 尹雄, 罗尧治, 等. 考虑接触点摩擦的索滑移行为分析. *工程力学*, 2017, 34(8): 42~50 (Yu F, Yin X, Luo Y Z, et al. Cable sliding analysis considering frictional effect. *Engineering Mechanics*, 2017, 34(8): 42~50 (in Chinese))
 - 14 张鹏飞. 结构破坏行为的数值模拟计算方法研究[博士学位论文]. 杭州: 浙江大学, 2016 (Zhang P F. Research on numerical methods for structural failure simulation [Ph. D Thesis]. Hangzhou: Zhejiang University, 2016 (in Chinese))
 - 15 秦剑, 乔良, 张映晖, 等. 多档货运索道动力计算方法及结构冲击影响研究. *动力学与控制学报*, 2020, 18(2): 59~68 (Qin J, Qiao L, Zhang Y H, et al. Calculation method for dynamics of multi-span freight cableway and influence of structure impact. *Journal of Dynamics and Control*, 2020, 18(2): 59~68 (in Chinese))
 - 16 李君章. 输电线路张力架线实用技术与计算. 北京: 中国电力出版社, 2018: 43~64 (Li J Z. Practical technology and calculation of tension stringing of transmission line. Beijing: China Electric Power Press, 2018: 43~64 (in Chinese))

DYNAMIC CALCULATION METHOD OF MULTI-BODY SYSTEM OF TRACTION PLATE AND DOUBLE-PULLEY BASED ON FINITE PARTICLE METHOD *

Qin Jian^{1†} Jiang Ming¹ Jing Wenchuan² Jia Ning¹ Qiao Liang²

(1. China Electric Power Research Institute, Beijing 100055, China)

(2. State Grid Sichuan Electric Power Transmission & Transformation Construction Co., Ltd., Chengdu 610051, China)

Abstract According to actual contact relationships between the traction plate and stringing pulley in tension stringing construction of transmission lines, a multi-body motion system is constructed including traction rope, traction plate, conductor and double-pulley structure. A contact judgment method between wire rope, conductor, traction plate and double-pulley is then proposed in accordance with the actual situation. Combined with the spatial position relationship between the components, the force expressions of the element node are proposed based on the finite particle method, and the contact forces of the traction plate to the pulley under different contact conditions are obtained by penalty function method, leading to the dynamic calculation method for the contact collision between the traction plate and the double-pulley structure. According to the actual tension stringing construction, variations of pulley loads and swing angles during the contact process are calculated and analyzed. The rules of traction force, maximum contact force, pulley load and swing amplitude are summarized under the influence factors such as suspension length and traction plate thickness. The proposed calculation method can guide the structural design, construction and installation of traction plate and pulley in engineering, and provide technical reference for the construction of transmission lines.

Key words tension stringing, traction plate, double-pulley, finite particle method, contact force

Received 24 November 2020, revised 25 December 2020.

* The project supported by Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (5200-201955119A-0-0-00)

† Corresponding author E-mail: mechmath@126.com