

L)0D“ G T D“D› U#\$5] • 7'ç B T6*-A/£

5 -TÆwSñî)0

%D Û ÑEGT “ g Ý ; *b } Ô c /8 “ K•” D Û œß!!!xxo

...œ@Áµ & L)0D“ G T D“D› U#\$5] • Z'ç B T6*-A/£±±: Bàwý ' ³ - .ú & G T D“D› U#\$5] •
Z'ç B T6*±±A/£ æ' & ü•jkKè ù N, ±±¶¶KçFü' / IÖ'ç B ÈE =y • w /ø GD› çœ Ò?
N, £ ÈO'0'@î GD› ç™ Ò? N, Fç'U' » @øw Ò?)3@ç±X - L'çì T f 1TKhi N,] L•
È “ ï • Z Ý#(í] • G Ó È(Ý#\$5] • ±±@ç' ¹ @ç ' » L)0D“) 7W, ÒÈ “ 5• 5 , ,L
-, - p wCc, %Á , ,L/8 ¼ w = X 6 0.úD›] Ò? N, ±±; D“ ÒÈ “ , ,L6* È %~LD“g , w
EÖô Xi ž›Uj Dœ# ' 7 4C8 ¼' /ø%~LD“; D“N, w8 X UDœ] • ' # \$ 5] • Z & £ E =y ÒÈ
“ , ,L w ' 'ç B ÒÈ “ ' T 4 È=•; wU#\$5] • 7%~LD“±±D“ €ELO” Ò°T wý È#\$5] •
Ž # 8%~LD“ 8äÄ! T±±/ IÖ'ç B È

œj[œ@ÁG T D“D› D›] Ò? # \$ 5] • 'ç B T6*
Z + 31" \$ Á ê ßžœœœ' ([4 -. Äöœœœ' 0 4C\$ Áß!!!Kœ' %ø! O! o! Kßx! K

œœL)0D“\ =yO£U L)0=•L• £ ' = ï "x 50 &c
Kó¹ 3 ½ d î 0v: o (Í ±±@UD“D³ U L)0 È]
ï "x ZB¶] L' e Fúç±±%U%> * œ• U - , %~L
È] ï "x (í %
L)0D“=yOç±±•L•(Ü° L' e : o " ! - 5)0=•
L• ^>³, ,m- o L o "UP] ' 5"±+ó] 3 0,m
G.ú1", Ö- ß0 #~L L =o TF 3^3ó• 1ç }
± = "K' ³ L ' 1 E L x CE 6 TFüÖ- °0%4 @Í
k.g %~L=L• Ö- 3 0 ó Ó/8 ÓT » 5)0 °%

DpÈ j * ² C µ G “ 52UD› Ò? ÒÈ “ æL•
E =y³ TFü-A/£ %µ & GD› çœ ±±D›], %ç %
U"4 “ 52 > ' ' çxó' /ø³ > ' ' ç-, N, ”
ü•jk¹ • ù "⁴ 5 ÈO'1 & > ' ' ç-, N, E =y
³ • " ' /ø³ Ý±±D›], %ç %U ü•jkKè ù -,
N, %U L —4" T ±±A/£ 7 ".Uç =0v ' óý '
³ ~ T L ±±—4 Á È; —4 z/(@DÄ™< %D Û
ÑEGT “ Sñî)0 KL œ' » > ' ' çN, & GD› çœ
L Ò? N, E =y • %µ & GD› ç™ D›] ±±;%ç
%U” ò A\$ GT “ &ç.4 òUÖ- N 5L• Ö-
& GD'E =y, D› ÈO'1%U GD› çœ ¹ GD› ç™ 0

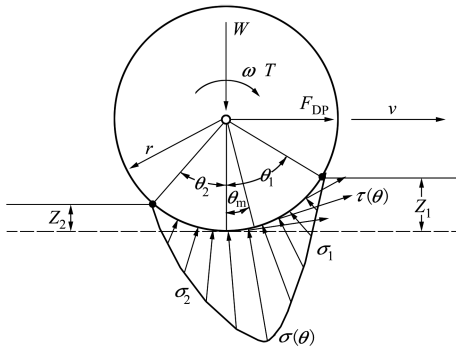
.úD›] N, 4) 5 Á*U7±±' ([D°> %: @ç %~LE
\ 5)0 "L)0D“D“D›F* G UDœ ¹ -™ ±±#\$5] •
7Dý=y"-A/£ L)0D“U#\$5] • 8D›] %U & L)0
ï "x ± 6 Fúç±±< v %& » X 6D›] Ò? È±±L)0
D“; D“ ÒÈ “ N, ” L Ö G € ÒÈ “ Dœ# ' /ø
XD›] Ò? %UÈ±±L)0D“; D“ ÒÈ “ N, ” & L
)0D“U L)0=•L•] • 7±±È “ ' T ! í • L• ¹
,L È] 3 ½ %4* ÄLç]] Uv òL Ö Xi ž›Uj
Dœ# £4 5D› Ò?) 3@ç'- p³ , ,L ± ö• 6K
Xç %6 Ä T “ 9° "p0v ß0' » ö›Uj Dœ# & :
9DýÖ âE =y³ ÒÈ “ , ,L ÷ 3 ½ %
Y ' U 3 ½ GD› çœ ¹ GD› ç™ 0.úD›]
Ò? N, ±±' -m7 " & ü•jkKè ù D›] Ò? N, E
=y³ !¶KçFü' / IÖ'ç B È±± • ; ÈO'0'@î"8ä Ä
ó→ AE/*U/8 ¼, ,L±±D›] Ò? N, %EÖô#(í]
• G Ó È(Ý#\$5] • ±±@ç' ; @ç " ' » L)0D“)
7W, ÒÈ “ 5• 5 , ,L °E =y - p "3 0.úD›]
Ò? N, 4Cc = , ,L/8 ¼” šD:OžÖ%~LD“g , ”
EÖô Xi ž›Uj Dœ# ' /ø%~LD“; D“ ÒÈ “ N, ”
-A/£ %~LD“ U#\$5] • 7±±ç B T6* %

c/l L ÄO! O! K K
%520- ø ß -TÆwSñî ò o" D Û ÑEGT “ -, -A/£ *L "h>œú , D› Ò? ÒÈ “ -A/£ %
EG %52 Äñî)0 % œ œ o" D Û ÑEGT “ œt µ "h>œú , g Ý G € ÒÈ “ -A/£ % ¶ U-á vœUçk@&wž, üžj

Ôf D>] Ô? È " N ,

ÔÖf GD> fDœ D>] Ô? N ,

D"D> ; L ,% ç %*U# "D"D> UD³8±±%*U 8
 - L p*L!¶Kα"U] L• È " Z "D> 8 L ±±Á È'
 T 3 g - , " T 1 -4" T " - , " T ±±N , Fô*U
 ü • çkKë ù • Á È N , "ò" -4" T ±±N , Fô*U
 .Uç• =-4 N , °%UDœ] • Z "D"D> È - + B
 m.g % Z âW "T 1 F_öë 3 X g D"D> m D³8±±Ö
 È- 1 / IÖ'ç B È + g D"D> w ± Z_0 3 X g D"
 D>±- T!¶Kα¹ L f P Ó_θ_0 ¹ θ_1 3 X g
 E ' >ÿ &è è>ÿ¹ - T Á È >ÿ ¹ v g D"D> >ÿ ELÓ
 ¹ z E ELÓ ç g • Á È ç g -Á È %



+ BœD"D> UDœ] • Z±± È 3 ½

f > ü • çkKë ù • Á È N , " - , N , Z • Á È σ %0 3 0 - %0 < m.g "ò

$$\begin{cases} \sigma_B \%0 = \left(\frac{k_c}{b} + k_\phi \right) r^n \%0 \dot{\theta} - \dot{\theta} \theta_B \sigma \\ \sigma_0 \%0 = \left(\frac{k_c}{b} + k_\phi \right) r^n \times \dot{\theta} \theta_B - \frac{\theta - \theta_0}{\theta_1 - \theta_0} \frac{1}{4} \\ \sigma \%0_B - \theta_1 \text{ o } \dot{\theta} - \dot{\theta} \theta_B W \sigma \%0_j \theta < \theta_1 \text{ o} \end{cases}$$

œœD"D> UDœ] • 7=yO£# £ m6* Ô*L±±- T'ç
 B È] L 4 > Ä -4 g ÓK} c " f > .Uç• =L
 -4 N , "L -Á È τ %0 3 0 > î %0 < °

$$\begin{cases} \tau = \%0 + \sigma \text{ WL} \text{ ç } \text{o } \frac{1}{4} \%0 - \text{q} \text{K} \text{o} \\ j = r \%0_B - \theta \text{o} - \%0 - s \text{o} \%0 = \theta_B - \text{ç} \text{o} \text{O} \end{cases}$$

œœD"D> ¶KαFüZ \ ü E 8Kç8 Ó " f > D"D> UDœ
 L] • 7±± , 2(Ä] " - %0 < m.g "¶!¶KαFü
 TM < Ä] D"D> ±± E ' >ÿ θ_B %

$$Z = r \%0_B - \dot{\theta} \theta_B \text{ o} \quad \%0$$

œœD"D> #pDTM \ ü E D"D> ±±- WL < eFü > ç ±ä .

Fü" ú M³ D"D> È Kr z E 3ì ELÓ ;) 3 @ç • ELÓ
 ±± | / 8 Ó % #pDTM s * ^ %0 < Ä]

$$s = \begin{cases} \frac{r\omega - v}{r\omega} \text{œ} \omega > v \text{ " ! } j \text{ s } j \text{ B} \\ \frac{r\omega - v}{v} \text{œ} \omega < v \text{ " - } \beta j \text{ s } < ! \end{cases} \quad \%0$$

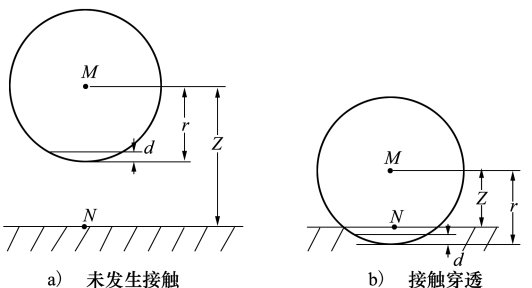
œœ3 • Á È σ %0 ¹ - Á È τ %0 UD"D> ; L
 Ô? g ² E =y/ 3 " Ä] D"D> UDœ] • Z ±±
 > \ . È F_N & IÖ'ç B È F_öë ¹ ÖZÖKhÈ- M_ω " > î
 %0 < "ò" & GTD"D> UDœ] • 7=yO£# ±±
 D>] Ô? È ¹ È- E =yM±x % £ Z " / IÖ'ç B È
 F_öë \ * ^ L & D"D> ±±Kqm È P ¹ , ÈKhÈ R_ü 3ñ
 = %Kqm È P \] L • & D"D> ±± z E Ö È " , ÈKhÈ
 R_ü \] L • Kh° D"D> z =y±±KhÈ %

$$\begin{cases} F_N = rb \left\{ \ddot{\theta}_1 \sigma \%0 \dot{\theta} + \tau \%0 \dot{\theta} \right. \\ \left. \text{œ} \ddot{\theta}_0 \sigma \%0 \dot{\theta} + \tau \%0 \dot{\theta} \right\} \\ F_{\text{öë}} = P - R_{\dot{\theta}} = rb \times \left\{ \ddot{\theta}_1 \tau \%0 \dot{\theta} \dot{\theta} + \right. \\ \left. \text{œ} \ddot{\theta}_0 \tau \%0 \dot{\theta} \dot{\theta} - \right. \\ \left. \text{œ} \ddot{\theta}_1 \sigma \%0 \dot{\theta} \dot{\theta} - \ddot{\theta}_0 \sigma \%0 \dot{\theta} \dot{\theta} W \right. \\ \left. M_\omega = r^2 b \left[\ddot{\theta}_1 \sigma \%0 \dot{\theta} + \ddot{\theta}_0 \tau \%0 \dot{\theta} \right] \right\} \quad \%0$$

œœü • çkKë ù N , 6*M±x GD> UDœ] • 7
 ±±D>] Ô? È ¹ È- %

ÔÖf GD> f-TM D>] Ô? N ,

GTD"D> L)0D" U-TM L • 7=yO£# "D"D> m
 - ,! D³8±±W"] L • & D"D> ±± \ . È F_N ¹ - È F_f %
 GD> - -TM Ô? N , , 8 %0 G € - G € Ô? -
 N , " f > @ ç W Ô?) 3 @ç * U X - L < 3ì T f 1 T
 Khi N , @ ð Ä Q G € K ! Ô? È " C - Fô*U À S
 - N , % - + 0 m.g %



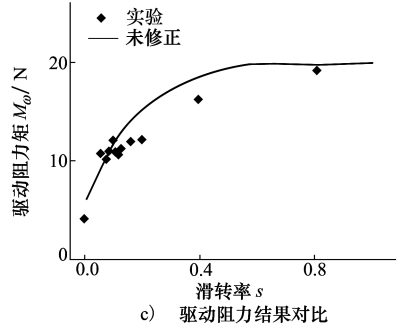
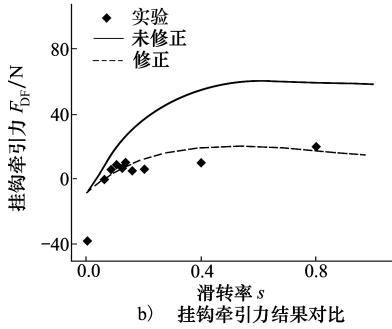
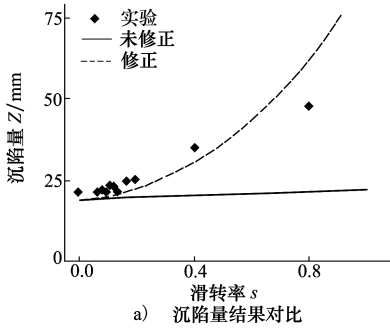
a) 未发生接触

b) 接触穿透

+ 0œD"D> ;] L • Ô? N , g < +

=y@4) "f > ËO1• > E=y 5 i "Ä] KqÍ KhÈ
 • 2(• m g !Ž30" %U4 Ç : 9 #pD™ ±±ò â
 8 "Ä] D"D, , ,L4 É %
 , D, ËO'4 É ; , ,L4 É &! - + m.g %û
 + UbZ - âW • ±±¶ KαN , K¼#pD™ CD°
 < 'E \ g N , Z W50;~D"D)*^ » #pD™m) 7! ±±
 D"D, 8 Kα#pD™ B· T " #pD™¶ KαFüB· T " • ; ±±
 ¶ KαFüN , ; ËO'4 ÉB, » - 7! +û + &oZ - â

W • ±±/ IÖ'ç B È N , U#pD™ 1 » ! 2! Ž x
 K! # ; ËO'4 É ' Y0S5 "€#pD™ T » ! Ž # "W
 • ±±/ IÖ'ç B È N , ; ËO'4 É, % D°T "' (Y
 | \ gD"D, U#pD™ D°T # "D"D, #pD™GS '
 KqÍ ±±KhÈ " • ; ±±/ IÖ'ç B È ±± CB, i ; Ë
 O'4 É ' Y - 7! +û + ùò - "ü • jkK ù N , Ož
 ÖKhÈ- ; ËO'4 ÉB, i 7 - 7! %



+ œ, ,L4 É ; ËO'4 É &!

ú±D>] Ò? N , ±±/8 ¼ Ë(Y

úž±] • ? 3 ;] • G Ó ±±Ç v
] • üE û QæL•50;~ ât] • ±±P { Bα< +æ
] • ±±! T %] • ' T 2 Dœ] • ±±L È " i
 • 1 -™] • ±±Ò? È " i • %Y ' EÖô ww8
 ¼ Ë(Y] • ±±± ' %€] • gDœ] • # " 3] •
 ‡ 8 1)3 â
 ßo t @ë • m1 L• g xoy "U] • 7!i ,m!a
 æ>±±x 1 y æ> 7 3] • ? 3 =0vK!C ±± æ
 • i } +
 0o ü Wi } ±±M%æxμ z æ>±±} 4 i ' =•.g
] • %æP Ó +
 o 3] • i } ±±6 4! M%æ ,m &>ÿ3i æ>E
 ÒBα' "• =] • 6>ÿ• %
 EÖô 7 ú %3Dœ] • ? 3 = 6>ÿ• 4~i %
 UDœ] • ? 3 ±±' -m 7#(Í] • G Ó • 3ñ"EÖô
 &] • G Ó ±±Ç v g 3] • gDœ] • 1 -™]
 • %α € ú %âU ü Wi } ±±M%æxμ] • G Ó i
 D_K "UDœ] • Z] • G Ó i D_K ! "U-™] •
 Z] • G Ó i D_K β%] • i • D_K 6 ! 1 β# "]
 • *^Dœ] • 1 -™] 3ñ=#\$ 5] • %L È " i
 • &Ò? È " i • 1] • ±±! TEÖô, ,L/8 ¼A(

Fz4> ' # ' 8ä] • ' T, % i • %
 úž±D>] Ò? N , /8 ¼ Ë(YDð8
 EÖô ò>U Dœ# ' /ø L)0D" ; D" N , "UD"D
 , Z ð z 4 1 EÖô Hè • 6 , pE =yD>] Ò?
 %*UÈ ' N "' » Xi Ž>U Dœ# ' & Hè i > }
 /8 ¼E =y1 N - β %U@Ç±± â 8A0UD>] Ò?
 N , @ÖÄ } /8 ¼ & L)0D"E =y; D" Ö È " , ,L %
 U , ,LDð8 Z "f > D"D ;] L• Ñ%æ±G Ó i
 -> ÇD>] Ò? • < "° È > D>] Ò? N , !o È 1 È
 - %α € ' OÑD"D ;] L• Ò? %*U# "...U 0WÑ
 %æ« ' Ñ%æU 6>ÿ• "f > A 6>ÿ• VM%æ±
 G Ó!o Ñ%æ±G Ó i "@Ç Ñ%æ±G Ó i g mU 6
 >ÿ• ±± VM%æ±G Ó i ±± t i "° f > Ñ%æ±G Ó
 i E6 D>] Ò? N , !o ? %@D"D ;] L• ±±Ñ%æ±
 J_B 1 J_0 Ñ%æ± & Á±±] • G Ó i 3 X g D_K_B 1
 D_K_0 "€D"D, û Dœ] • Dœ#N-™] • # " D_K_B 3
 ! "D_K_0 = ! "D"D, z - WÑ%æ± »-™] • 7 " ; - W
 Ñ%æ± » Dœ] • "' # "D"D ; Dœ] • ±±Ò? Bα
 h>@%*U"€ Q Ú] D_K_0 3 ! # "' # "D"D, 1 • 1 »
 -™] • 7 D"D, û-™] • Dœ#N] Dœ] • # "
 D_K_B = ! "D_K_0 3 ! "D"D, z - WÑ%æ± » Dœ] • 7 "
 ; - WÑ%æ± »-™] • 7 "' # "D"D ; -™] •
 ±±Ò? Bαh>@%*U"€ Q Ú] D_K_0 = ! # "D"D, 1 •
 Dœ#N] Dœ] • 7 %

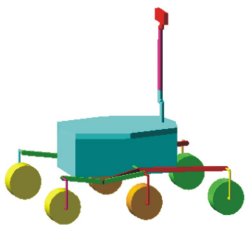
¼%~LD“ j D“ , ,L

¼Ö† , ,L Ž # @đ

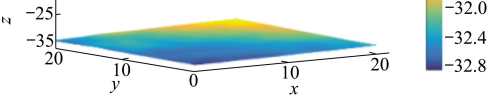
%~LD“ @g , "EÖL)0D“) 7W; Ö È “ 5•
5 , ,L 1 7 408 ¼” &%~LD“ j D“E =y Ö È “
, ,L "f › %~LD“D› Ò? È 1 È- , ,L4 É ”&%~
LD“+±ç B T6*E =y Q Ú %

%~LD“4 ± + xUbm.g "D“D› ê ß" ùj "D“
D›! ± " ùj "zD›; ZD›D›C g ùj "ZD›; ;
D›D›C g ùj " D›; D›D›C g ß0! ùj "%~LD“
hBUfÜ3Óg 0"! 'kD“ € 1 » xoy L•2 "FúÈ Í EL
Ó!ì ,m q æ> %

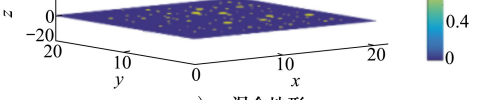
â @đ â†] • • 'ã g 0!] ! 0!] ++• æ•
] • "] • P Ó6 - Ç++B< C"] • G Ó• F @ë
4› g !" • =Dœ] • +æU† ZK¼g k4› g %g ß"
2 ! ùj " ! 2 ! ùj 1 T » ! ùj ++ „ " • =#\$5
] • + xùom.g +e U† Z] • +±] • G Ó - w
@đ› g Dœ] • " - 7Y@đ› g -™] • " - Ä%~LD“
Ô WD“D›=yB• UDœ] • 7 " Ô WD“D›=y
B• U-™] • 7 %



a) 火星车模型



b) 软土地形



c) 混合地形

+ xœ%~LD“ N , ;] • .g < +

, ,L Ž # @đ %~L=•L•++FúÈ Í ELÓ Ž] ð
0" >óELÓ ùj ð"D“ €BUð k U %“y "z og %“
ß!" oz 4› 1 " -%~LD“!ì ,m x æ>DýÖ ß!! "L
È “ i • 1 Ò? È “ i • @đ› i &”=• 0%

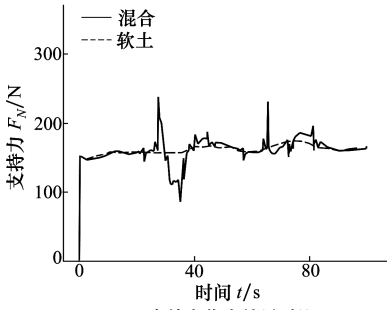
=• #† L È “ i • 1 Ò? È “ i • ÓÓ»

i • : /	i
• 4 • N	ß
2 5† È • NFük_c ð%¼ ùj q%wso o	! Žx
- • NFük_b ð%¼ ùj q%wo o	! Ž0
2 5† È c ð%¼ ùj qo o	! Ž@
2 - >ÿç ð%o	"
-4 • NFüK ðj	ßŽ
Ò? g G Ói K_d ð%¼]] qo o	" !!!
È 4 • N	0
- TKhi 2(• c_1u	!
• Khi # - T/-EçFüð ð]	! Ž
L†- • μ_s	! Ž@
Ö- • μ_d	! " @
L†- D™ ELÓ v_s ð%¼] ¼ qo o	! Ž
Ö- D™ ELÓ v_d ð%¼] ¼ qo o	ß!

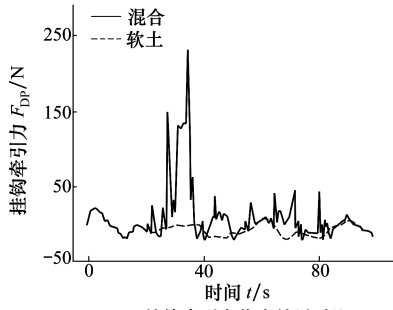
¼#† , ,L4 É 3 ½

%~LD“ UDœ] • 1 # \$ 5] • 7 D“ €DýÖã .
, ,L4 É + " m.g %+ " Ubg D“ €BUð z 4› , ,L
4 É "9 - , ,L Ž # 8 "#\$ 5] • 7 D“ €BUð z 4› U
ý È # h* P » Dœ] • 7 D“ €BUð z 4› ++ " &o
g%~LD“D“ €BUð ELÓ " UDœ] • Z "D“ €ELÓ
C μ 4@' U#\$ 5] • Z "D“ €ELÓ C! D° " %ð%
*^ » U#\$ 5] • 7 ý È # h%~LD“D“D› Dê „ "
- ÄD“D›ELÓ p*L C"- 3ðELÓ++ C œú M]
D“ €BUð ++ELÓ C 7 %

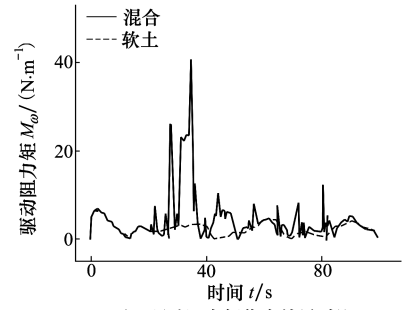
*^ » %~LD“D“ € Q Ô » D“ €3â >*yL• &/ "
%~LD“ Ô WD“D› g , " 3 ½%~LD“ U#\$ 5]
• 7 ++ , ,L4 É " + g%~LD“ z &Z 1 ; D›++DýÖ
'ã . " Ä ß" Ä 0 1 Ä 3 X=•g z &Z 1 ; D› %*^
+ U b , 8 ' U ý È # hD“D›BUð z 4› 6 ; k ++
%Bα 1 8 9 j C " %Bα=•g D“D› û Dœ] • Dê#N]
-™] • " 8 9 j =•g D“D› û -™] • Dê#N] Dœ]
• ++ &og Ô WD“D›D› ð ELÓ C 3i " W



a) 支持力仿真结果对比



b) 挂钩牵引力仿真结果对比

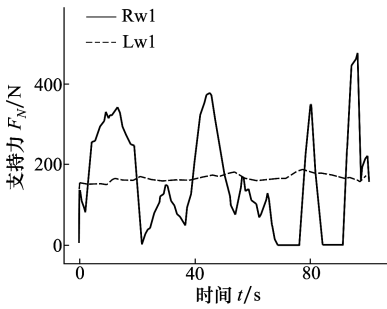


c) 驱动阻力矩仿真结果对比

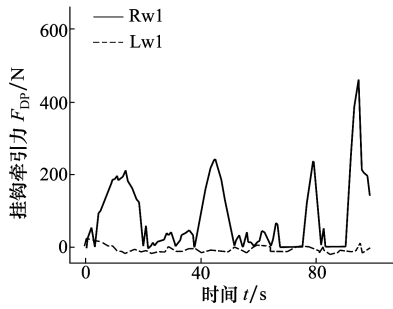
+ 0œ z D› È¹ È- ,L4 É &

œœ%~LD“ U â e Z z D›¹ z D› ,L4 É &
 ! - + m.g ”+ Z • ß=•g z D›%+ Ubg z
 D›\ . È ,L4 É ”D“D› UDœ] • 7+±\ . È
 C μ 4@’U-™] • 7+±\ . È C! D° ”%ð’
 + &og z D›±±/ IÖ’ç B È ,L4 É ” ,8] U
 Dœ] • 7D“ € - ELz E # ”D“D› ý È±±/ IÖ’ç B
 È μ < ”U-™] • 7 ”D“D› 8äÄ! T±±/ IÖ’ç

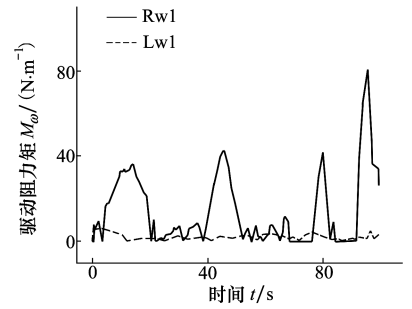
B È ”/ IÖ’ç B È ÈKr\ • F *^] L• &D“D›±±-
 È ý È ” - È] L• &D“D›±±\ . È ; - 2(•
 ž ú %+ ùog z D›±±OžÖKhÈ- ,L4 É ”U-™
 -] • 7D“D›±±OžÖKhÈ- ; D“D› m - È 6
 ”m ,8] -™] • 7D“D›±±OžÖKhÈ-
 CB,ì ; / IÖ’ç B È & Á±±B,ì ’ Y - ?! ”U-™
] • 7 ”D“D›L->@! T±±OžÖÈ- %



a) 支持力仿真结果



b) 挂钩牵引力仿真结果



c) 驱动阻力矩仿真结果

+ œ%~LD“ z D› È¹ È- ,L4 É &!

‡4 ‡@ç

ßo & ü • çk±±N , Z!¶ Kα¹ / IÖ’ç B È È =y
 • ”U!¶ KαN , ’ -m750;~#pD™¶ Kα±±ž ú ”U/
 IÖ’ç B È N , ’ -m750;~#pD™¶ KαBBα#pD™hÈ±±
 ž ú ”£E =y, D› ÈO’O’@i” • ; ±±¶ KαFü¹ / IÖ
 ’ç B È ; ÈO’4 É ’ Y h 5 %
 0o U] L• È “ i • Z Ý#(í] • G Ó i • È

(Ý#\$5] • ±±@4) ”L)0D“ U#\$5] • ZE =yÖ È
 “ ,L # ”E@ôQ ÚD“D› ;] • Ñ%æ±G Ó i ’ ->
 ÇD›] Ò? N < ”È(Ý³ L)0D“ U#\$5] • Z±±Ö
 È “ ,L %
 o U#\$5] • Z%~LD“D“ €=yE ELÓ” Ö T ”
 D“D›\ . È & IÖ’ç B È¹ OžÖKhÈ- 7 8 Cr
 ÓD°T ”U ý È] • 7 ”D“D› 8äÄ! T±±/ IÖ’ç
 B È %

ï 50´ ([Å

