

3506 気動車の空転制御用速度の検出方法

Detection of Speed for Anti-Slip Control of Diesel Rail-Cars

正 [機] ○中村 英男 ((財)鉄道総合技術研究所) 村上浩一 ((財)鉄道総合技術研究所)

Hideo NAKAMURA, Railway Technical Research Institute, 2-8-38, Hikari-cho, Kokubunji City
 Kouichi MURAKAMI, Railway Technical Research Institute

Diesel rail-cars are frequently subjected to wheel slips on steep gradient lines. As a countermeasure against this tendency, a method to prevent wheel slips by controlling engine output is now being developed. Although speed is a vital information element in controlling wheel slips, it is difficult to detect speed at high precision when diesel rail-cars are starting or running at low speed. This makes it difficult to fully exhibit the effect of anti-slip control. To detect speed at high precision in the low-speed range, therefore, the authors set an appropriate threshold value for speed pulse detection and improved the method of speed calculation. This paper describes the method of detecting speed for anti-slip control based on the above concept.

Keyword:: diesel rail-cars, speed, speed difference detection, slip, tachometer generator

1. はじめに

急勾配線区において多発している気動車の空転対策のため、機関出力制御による空転制御を開発した⁽¹⁾。空転制御における空転発生検知の判断は、動軸と従軸との速度差が、設定されたしきい値を超えたことによって行われる。したがって、空転発生を極力早く検知し速やかに空転を抑制するため、誤検知をしない範囲で空転発生検知速度差のしきい値を小さく設定することが望まれる。そのため、検出速度の精度に影響を与える要因の検討と対策を行った。速度発電機 AG20 等のドライブピン方式に顕著な、起動・停止時における検出速度の変動対策として、パルスの偏在に着目し、前回の検出速度を採用する方法により、変動を約 2km/h に抑えることができた。この対策により、空転発生検知速度差のしきい値を 3km/h とすることができた。本稿では、これらの検討と対策について述べる。

2. 気動車の空転制御用速度センサ

速度パルス（以下単に「パルス」）の検出は、車軸の回転に伴って発生する速度センサの出力波形を検出することにより行う。気動車の代表的な空転制御用速度センサの特徴を表 1 に示す。

方式 1 は、変速機体の変速機歯車外周に近接する位置に取付けられた電磁誘導式センサにより、変速機歯車（ロータ）の回転を検出する方式である。

方式 2 は、軸箱の前ふたに取付けられた速度発電機により、速度発電機の歯車状の誘導子（ロータ）の回転を検出する方式である。センサとロータは速度発電機として一体構造になっており、ロータは車軸端に取付けられたドライブピンによって回転する。

方式 3 は、軸箱の前フタに取付けられた高周波発振式センサにより、車軸端に固定された回転検出用の歯車（ロータ）の回転を検出する方式である。

方式 1～3 のいずれも、車軸 1 回転当りのパルス数 (p/r) が少ない、ロータの偏心がある、ロータと車軸とに遊間が

ある等により、検出速度の変動と最低検出速度の面から、検出速度の精度には限界がある。次項に、検出速度の精度に影響を与える要因について述べる。

表 1 気動車の代表的な空転制御用速度センサ

項目		方式 1	方式 2	方式 3
センサ	形式	電磁誘導式	誘導子式発電機検出コイル	高周波発振式
	出力波形	正弦波	正弦波	矩形波
	出力電圧	周波数に依存	周波数に依存	一定
	取付位置	変速機	車軸端	車軸端
	対象車軸	動軸	動軸、従軸	動軸、従軸
ロータ		変速機歯車	速発誘導子	車軸端歯車
ロータへの車軸回転の伝達		推進軸等を介して伝達	ドライブピンを介して伝達	ロータと車軸とはボルト固定
ロータと車軸との遊間		有	有	無
ロータの偏心		無	有	有
パルス数(p/r)例		44.8、154.2	60、90	24

3. 検出速度の精度に影響を与える要因

3. 1 低速度域の出力波形の歪みとパルス検出下限速度

方式 3 の高周波発振式センサの出力波形は矩形波であり、出力電圧は周波数に依存せず一定であるため、原理的にパルス検出の下限速度（以下「パルス検出下限速度」）は無い。

一方、方式 1、2 の速度センサの出力波形は正弦波で出力電圧は周波数に依存するため、出力波形をパルスとして認識するしきい値以下の出力電圧ではパルス検出できない。したがって、パルス検出下限速度が存在する。方式 2 の速度発電機 AG20 (90p/r) の起動時における出力波形を図 1 に示す。速度が低く出力電圧が低い場合には、出力波形は複数の極値を有する歪んだ波形となる。したがって、出力波形をパルスとして認識するしきい値を、歪みが無い出力電圧以上に設定する必要がある。

図1の出力波形では、出力電圧(0-P) 1V以上では歪みが見られないことから、しきい値の設定を1Vとすることが適当と考えられる。この場合の周波数から、パルス検出下限速度は約1km/hとなる。

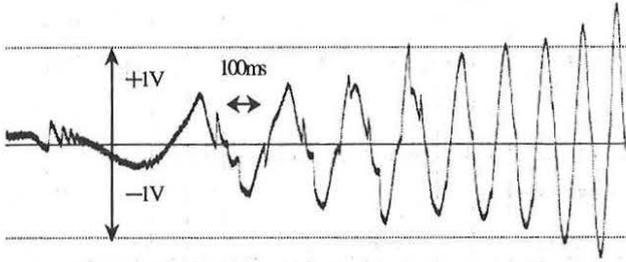


図1 起動時のAG20出力波形

3.2 速度算出方法と算出下限速度

速度算出可能な最低速度(以下「算出下限速度」)は、速度算出方法と車軸1回転当りのパルス数に依存する。パルス間隔計数方式⁽²⁾を基本とした式(1)及び図2(a)で速度算出する場合の算出下限速度について以下に述べる。

$$V = (3.6 \times \pi \times D / T_p) \times \{(n-1) / P\} \dots\dots(1)$$

D: 車輪直径, T: 速度算出時間幅、

$T_p = T - \Delta T_1 - \Delta T_2$: パルス間隔時間、

n: 発生パルス数, P: 車輪1回転当りパルス数

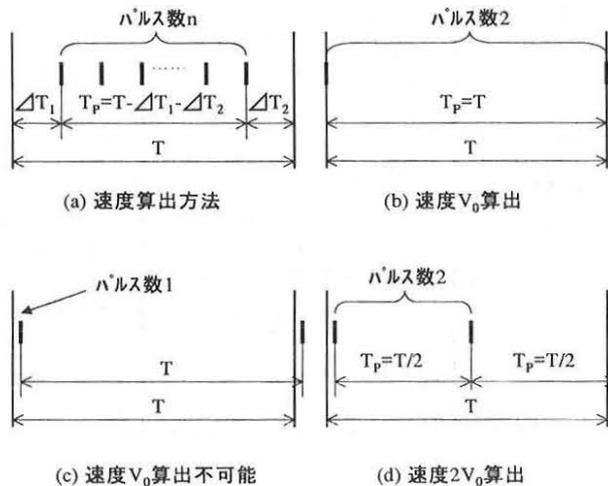


図2 速度算出方法

式(1)から算出下限速度は、 $n-1$ が最小、 T_p が最大となる、 $n=2$ 、 $\Delta T_1 = \Delta T_2 = 0$ 、 $T_p = T$ の場合である(図2(b))。この速度を V_0 と表す。例えば、 $D=0.82\text{m}$ 、 $T=0.2\text{s}$ (200ms)、 $P=90$ の場合、 $V_0=0.52\text{km/h}$ である。ところが、速度が V_0 であっても、速度算出とパルス発生タイミングが合わなければ $n=1$ となり、速度算出ができない(図2(c))。定常的に速度算出が可能な速度は、常に $n=2$ 以上となる速度、すなわち $2 \times V_0$ 以上であり、 $2 \times V_0$ が事実上の算出下限速度である(図2(d))。上記条件の場合、 $2 \times V_0=1.03\text{km/h}$ である。

車輪直径 D と車軸1回転当りのパルス数 P はハード的に

決まっているので、算出下限速度は速度算出時間幅 T によって決まる。速度算出時間幅 T を長くすると算出下限速度は小さくなる。また、検出速度の変動が平均化されて小さくなる一方で、速度の検出遅れ($=T/2$)が大きくなる。

したがって、算出下限速度、速度検出の遅れ、前述のセンサ出力波形のしきい値から決まるパルス検出下限速度、及び後述の検出速度の変動を考慮し、速度算出時間幅 T を決定する必要がある。具体例については後述する。

3.3 検出速度の変動

(1) ロータの偏心

方式3の車軸端固定歯車の偏心により検出速度が変動している例を図3に示す。車軸の回転中心とロータの回転中心が一致せず、偏心している場合に検出速度に周期的な変動が見られる。方式2の速度発電機で顕著に現れる。このロータの偏心による検出速度の周期的な変動については詳細な検討がなされている⁽³⁾。

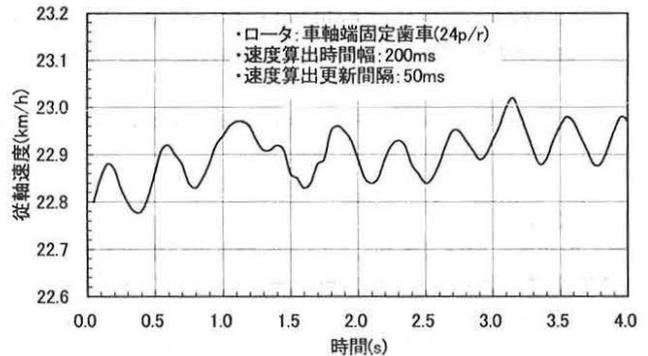


図3 ロータの偏心による検出速度の変動

(2) ロータと車軸との遊間・相対変位

機関ブレーキの速度段(クラッチ)切換時に、ロータと車軸との遊間・相対変位により検出速度が変動している例を図4に示す。方式1の変速機歯車がロータの場合、ロータと車軸との間に、ロータ以外の変速機歯車、推進軸ヨーク、及び減速機歯車等の動力伝達要素の遊間が存在するため、ロータの速度が変動する。また、推進軸の不等速、及び車体から防振ゴムを介して装架される変速機体の相対変位等に起因してロータの速度が変動する。このようなロータの速度の変動は、動力伝達方向が変化する場合に顕著に現れる。

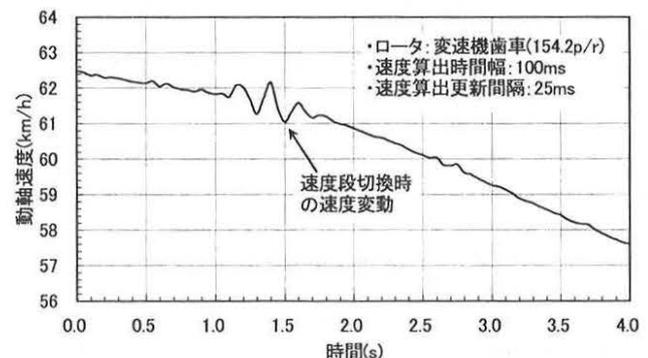


図4 速度段切換時の検出速度の変動

(3) 外的要因

力行中にレール継ぎ目で検出速度が変動している例を図5に示す。レール継ぎ目、他車両からの前後方向衝撃、及び軸箱と軸箱守間の遊間等の外的要因により車軸の速度が変動する。これらの外的要因のうち衝撃を伴うものは、上記のロータと車軸との遊間・相対変位によるロータの速度の変動を誘発する。

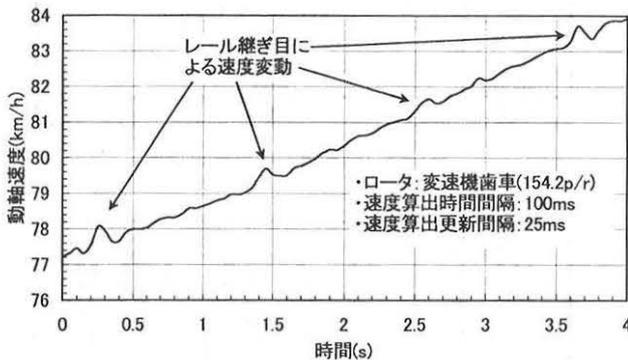


図5 レール継ぎ目による検出速度の変動

(4) 検出速度の変動値

検出速度の変動は、速度算出時間間隔 T により異なる。今までに実施した現車試験結果から、 $T=200\text{ms}$ の場合には、速度センサ方式1～3のいずれも、中速度域(約 60km/h まで)での検出速度の変動は最大約(0-p) 2km/h である。

3. 4 起動・停止時における擬似パルス

前述したロータと車軸との遊間に起因する検出速度の変動は、起動・停止時に顕著に現れる。起動時に検出速度が大きく変動している例を図6に示す。

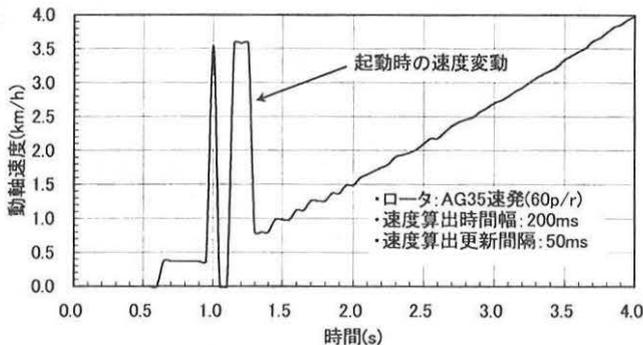


図6 起動時のロータと車軸との遊間による検出速度の変動

この変動の原因は、起動・停止の前後においてロータが遊間内で振動し、回転方向の変化(一時的に逆回転する)が繰り返されることによって車軸の回転とは別の速度パルス(以下「擬似パルス」)が発生するためであると考えられる。擬似パルスによる検出速度の変動は、 10km/h 以上となる場合がある。停止時における擬似パルス発生時の AG20 出力波形を図7に示す。

起動・停止時以外でこのような変動が顕著でない理由は、ロータの回転速度が大きいため、ロータが遊間内で振動しても回転方向が変化するケースは、前述の速度段切換時等を除けばほとんど無く、センサ出力波形が大きく変形する

ことは無いと推定される。さらに、擬似パルスが発生しても、式(1)のパルス間隔時間 T_p が起動・停止時よりも大きいため、速度算出結果に与える影響は相対的に小さくなる。

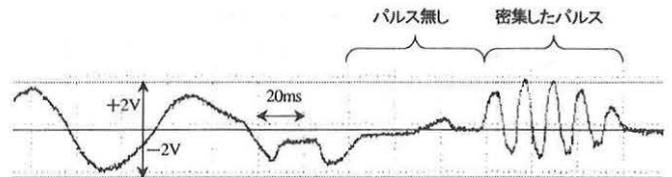


図7 停止時における擬似パルス発生時のAG20出力波形

4. 空転発生検知速度差しきい値の設定

空転発生検知速度差しきい値は、パルス検出下限速度、算出下限速度、及び検出速度の変動幅より大きくなければならない。気動車の空転制御⁽¹⁾で実施したしきい値の設定事例を以下に述べる。

本空転制御では、起動時の制御に重点を置いたため、極力低速を検出する必要があった。また、既存車両を改造するため、車軸端に速度センサを取付ける必要があった。したがって、車軸1回転当りのパルス数が極力多い AG20 を採用することとした。

前項の検討結果から、AG20 のパルス検出下限速度は約 1km/h である。速度検出の最低速度をこれと同じ約 1km/h とするため、速度算出時間幅 $T=200\text{ms}$ とした。 $T=200\text{ms}$ であれば速度の検出遅れは $100\text{ms}(=T/2)$ であり、気動車の空転制御を行うには満足できる。

また、 $T=200\text{ms}$ とした場合の検出速度の変動は、擬似パルスによる変動を除けば、中速度域で最大約 2km/h である。したがって、空転発生検知速度差しきい値を 3km/h に設定することとした。

ここで問題となるのは擬似パルスによる検出速度の変動であるが、次項に述べる対策を行うことにより、この変動を約 2km/h に抑えることとした。

5. 擬似パルス対策

5. 1 擬似パルスの判断と対策

図7から判るように、起動・停止時の擬似パルスは短時間に連続して発生し、その前後には暫くの間パルスの発生が無い時間がある。

この特徴に注目し、速度算出時間幅の中でパルスが偏在しており、速度算出結果が通常では有り得ない大きさとなった場合は、1つ前の検出速度を現在の検出速度とする対策を考えた。具体的には、速度算出時間幅をいくつかの領域に分割し、パルスが存在する領域と存在しない領域がある場合は、以下に示す速度検出を行うこととした。速度算出時間幅 200ms 、速度算出の更新間隔 50ms とし、領域が A～D の4個の場合について以下に述べる。

- ①領域 A～D の全ての領域にパルスが存在する場合、式(1)の算出結果を検出速度とする(図8(a))。
- ②領域 A～D にパルスが存在しない領域がある場合、式(1)の算出結果が「 $4 \times V_0$ 未満の場合」又は「50ms 前の検出速度未満の場合」は式(1)の算出結果(図8(b),(c))、式(1)の算出結果が「 $4 \times V_0$ 以上」かつ「50ms 前の検出速度以上の場合」は50ms 前の検出速度、とする(図8(d))。

領域	A	B	C	D
パルス発生状況				
パルス数	3	2	2	1
ΔT_1	5ms	-	-	-
ΔT_2	-	-	-	20ms
T_P	200-5-20=175ms			
式(1)V	4.12km/h			
$4 \times V_0$	2.06km/h			
前検出V	4.50km/h			
検出V	4.12km/h			

(a) 式(1)の算出速度が検出速度

領域	A	B	C	D
パルス発生状況				
パルス数	0	1	2	3
ΔT_1	75ms			
ΔT_2	-	-	-	10ms
T_P	200-75-10=115m			
式(1)V	4.48km/h			
$4 \times V_0$	2.06km/h			
前検出V	5.00km/h			
検出V	4.48km/h			

(b) 式(1)の算出速度が検出速度

領域	A	B	C	D
パルス発生状況				
パルス数	1	1	0	1
ΔT_1	10ms	-	-	-
ΔT_2	-	-	-	30ms
T_P	200-10-30=160m			
式(1)V	1.29km/h			
$4 \times V_0$	2.06km/h			
前検出V	1.50km/h			
検出V	1.29km/h			

(c) 式(1)の算出速度が検出速度

領域	A	B	C	D
パルス発生状況				
パルス数	0	1	2	3
ΔT_1	75ms			
ΔT_2	-	-	-	10ms
T_P	200-75-10=115m			
式(1)V	4.48km/h			
$4 \times V_0$	2.06km/h			
前検出V	4.00km/h			
検出V	4.00km/h			

(d) 50ms前の速度が検出速度

図8 擬似パルス対策

$4 \times V_0 = 2.06\text{km/h}$ は、一定速度であれば 50ms 毎にパルスが発生し、各領域には必ずパルスが存在する速度であり、この速度以上であれば安定した速度算出が可能である。

上記対策の問題点として、起動時に空転が発生し加速度が大きい場合、パルスが存在する領域と存在しない領域があるため、検出速度が 50ms 前の検出速度、すなわち 0km/h になってしまう恐れがある。起動時に 20km/h/s で空転が発生した場合を考えると、200ms 後には速度 4km/h となる。この間の平均速度は 2km/h であり、 $4 \times V_0 = 2.06\text{km/h}$ 以下であるため、式(1)の速度算出結果が検出速度となる。したがって、起動時に空転が発生しても 20km/h/s 以下であれば正しい速度検出ができる。

5. 2 擬似パルス対策の結果

以上の擬似パルス対策の結果を図9に示す。擬似パルスによる大きな速度変動が抑えられていることが判る。この対策により、起動時を含めた低・中速度域における空転発生検知速度差のしきい値を 3km/h とすることができた。

6. まとめ

- (1) 気動車の空転制御を開発するに当たり、空転発生検知の判断に必要な検出速度の精度に影響を与える要因について検討を行い、最低検出速度と速度変動の実態を明らかにした。
- (2) 起動・停止時における 10km/h 以上にもなる検出速度の大きな変動が発生する場合は、擬似パルスが偏在していることに着目し、前回の検出速度を採用する方法により、

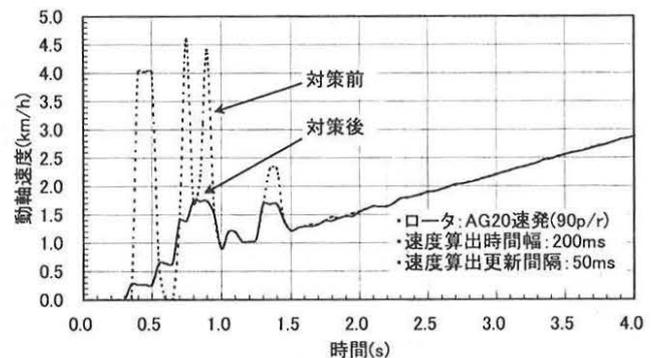


図9 擬似パルス対策の結果

変動を 2km/h に抑えることができた。

- (3) 上記(1)、(2)から、速度発電機 AG20 を用いた場合、起動時を含めた低・中速度域で空転発生検知速度差しきい値を 3km/h とすることができた。

参考文献

- (1) 村上, 中村, 滝: ディーゼル車両のトラクション制御, J-Rail'02, S1-2-5, pp173-176
- (2) 鉄道システムにおける粘着制御技術調査専門委員会: 鉄道車両における粘着技術制御, 電気学会技術報告第 673 号, p24-25, 1998
- (3) 渡邊: 車両速度の高精度検出, 1989 年電学産全大, 12, pp49-54