

# 滚动轴承车辆阻力试验研究

王 楨

(铁道部科学研究院)

**提 要:** 本文以滚动轴承重货车起动阻力及运行单位基本阻力试验所取得的实际数据与现行《牵规》的计算结果进行了对比分析和讨论, 指出应尽早修改现行《牵规》, 充分利用现有铁路状态潜力, 进一步提高铁路运能。

**关键词:** 牵规 滚动轴承车辆 列车阻力

我国现行的TB1407-82牵引计算规程是1976年开始修订, 1983年1月1日开始实行的。规程所使用的大部分为1976年以前的数据。我国铁路近十几年来发展很快, 铁路装备迅速更新换代。牵引动力已由蒸汽机车牵引为主变为以内燃、电力机车牵引为主, 蒸汽机车已停产, 内燃、电力机车已占机车总台数的70%~80%。车辆的变化更大, 60t载重的大型货车拥有量已占总车辆数的80%, 滚动轴承车辆已达60%以上。而TB1407-82列车牵引计算规程所规定的货车车辆起动阻力和运行单位基本阻力还是按滑动轴承车辆导出的, 货车阻力公式不能正确反映现实的运用情况, 影响到列车牵引计算的正确性, 使铁路运输能力不能得到充分利用。以1984年开通的丰台~大同西间电气化铁路为例, 大同~张家口间原设计使用SS<sub>1</sub>型电力机车, 计算牵引定数为3300t(由于受大同~聚乐堡坡道限制)实际上电气化铁路一开通, 大同~张家口间牵引重量即为3500t, 后改为3700t, 最后达到3900t, 实际牵引定数高于设计值18.2%, 电气化开通不到一年变电所就得增容才能满足运输要求。

1984年在执行六五攻关项目“重载5000t牵引试验”时, 我们通过对C<sub>61</sub>型运煤敞车试验提出了我国滚动轴承货车阻力小于滑动轴承货车阻力的具体数据, 并特别指出滚动轴承货车起动阻力与坡道无关。

1993年12月根据铁道部安排, 铁道部科学研究院机车车辆研究所与郑州铁路局合作在郑州铁路分局管内进行了C<sub>62A</sub>型滚动轴承重车的起动阻力和C<sub>62A</sub>型重车和空车运行基本阻力试验, 试验结果证明了环行试验线试验的正确性。

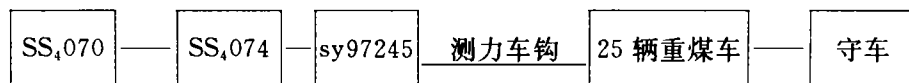
## 1 C<sub>62A</sub>型滚动轴承重货车起动阻力试验

### 1.1 试验条件

试验是在月山~高平间及新乡、月山和滑县南等车站内进行的。试验列车由25辆C<sub>62A</sub>型滚动轴承重煤车和一辆守车组成, 该组货车在焦作煤矿装车并经过称重, 列车总重为

本文收到日期: 1995年3月16日

2 069.1t。试验环境条件为晴天,无风,气温  $0^{\circ}\text{C} \sim 4^{\circ}\text{C}$ 。列车由  $\text{SS}_4$  型电力机车牵引,列车编组中加入郑州铁路局 SY97245 号试验车,SY97245 号试验车动力车钩与货车相连,其编组为:



试验数据由试验车微机数据采集系统采集并整理。

本次试验在不同坡道、不同曲线、站场及隧道内共进行了 79 次起动试验,试验坡道为  $-2.5\%$ 、 $-0.6\%$ 、平直道、 $2.1\%$ 、 $5\%$ 、 $5.4\%$ 、 $5.7\%$ 、 $7.5\%$ 、 $8.7\%$ 、 $10.6\%$ 、 $10.9\%$ 、 $11.6\%$ 、 $12\%$ 、 $15.3\%$ 、 $16\%$ 、 $18.8\%$ 、 $20\%$  等。起动地点曲线半径分别为:  $R_{300}$ 、 $R_{305}$ 、 $R_{350}$ 、 $R_{351}$ 、 $R_{357}$ 、 $R_{400}$ 、 $R_{600}$ 、 $R_{602}$ 、 $R_{1000}$  等。

置于列车中的车辆由于车钩钩舌之间有间隙,其连接为弹性联接,列车起动时不是所有的车辆同时起动,而是由前向后逐辆或逐组按顺序起动,这样的起动方式,由于各车辆间存在起动时间差,导致列车总起动阻力数值较小,不能为牵规提供可靠的起动阻力数值,所以本次试验要求做到首尾同时起动,具体做法是:列车采用低速停车,停车时机车施以一定的牵引力,以保证车钩处于拉伸状态;在坡道起动时,机车先施以一定的牵引力,然后缓解列车,再缓缓增加牵引力,直至列车尾部起动。在 79 次起动试验中只有几次守车后退,后退距离大致为  $100\text{mm} \sim 200\text{mm}$ ,试验过程很规范,实现了试验前的设想。

## 1.2 试验结果

$\text{C}_{62\text{A}}$  重货车单位起动阻力计算公式为:

$$W_q = 1\,000W / (G \times 9.81) - W_i - W_r$$

式中:  $W_q$  —— 列车单位起动阻力(N/kN)

$W$  —— 列车起动总阻力(kN)

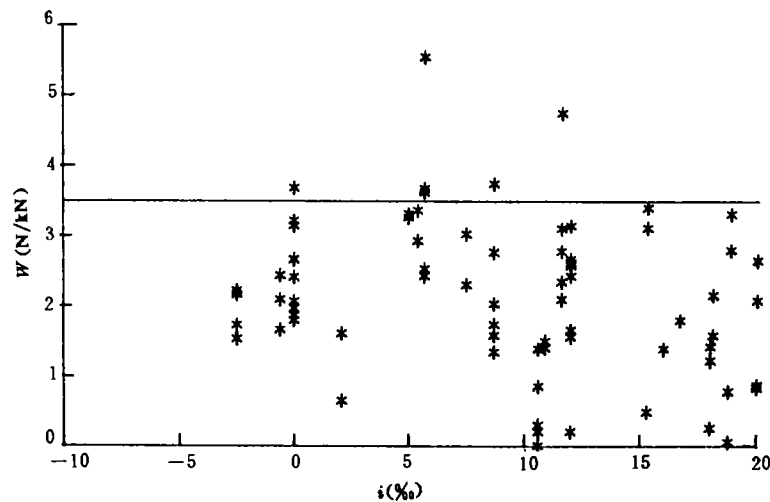
$G$  —— 列车重量(t)

$W_i$  —— 坡道阻力(N/kN)

$W_r$  —— 曲线阻力(N/kN)

列车起动总阻力是选取动力试验车所采集的动力曲线中相对于列车尾部守车动车时刻的数据。

$\text{C}_{62\text{A}}$  型滚动轴承重货车单位起动阻力试验结果见图 1。从图中可看出  $\text{C}_{62\text{A}}$  型重货车单位起动阻力按坡道分布是无规律的,即  $\text{C}_{62\text{A}}$  型滚动轴承重货车单位起动阻力与坡道无关。这一推论极为重要,它与目前牵规中所采用的起动阻力公式中含有坡道阻力项截然不同,验证了 1984 年环行铁道试验结果和推论的正确性。从图 1 还可见  $\text{C}_{62\text{A}}$  滚动轴承重货车单位起动阻力大部分低于  $3.5\text{N/kN}$ ,如果选取  $3.5\text{N/kN}$  作为  $\text{C}_{62\text{A}}$  滚动轴承重货车的单位起动阻力,可复盖本次试验 92.4% 的数据;如果扣除本次试验的不合理点,则可复盖 95% 的试验点。考虑到数据复盖面的合理性,又考虑到运用安全可靠,因此我们选取  $3.5\text{N/kN}$  为滚动轴承货车单位起动阻力。

图1 C<sub>62A</sub>重货车单位起动阻力

1984年在环行铁道试验线进行的C<sub>61</sub>型滚动轴承重货车起动阻力试验,由于受环行试验条件限制只做了直线、 $R=1\,432\text{m}$ 、 $R=600\text{m}$ 和 $R=350\text{m}$ 的平道试验。其对应的单位起动阻力分别为1.625、1.201、1.123和0.502N/kN,这些结果均在本次试验的数据范围内,且和本次试验规律相同,即小曲线半径时单位起动阻力较小。1984年试验之后,我们曾建议滚动轴承货车(敞车)单位起动阻力选用2.5N/kN。1988年铁道部标准计量研究所曾对C<sub>62A</sub>货车进行起动阻力试验,建议该车型起动阻力选为2N/kN。如选用2.5N/kN作为滚动轴承敞车起动单位基本阻力,则本次试验数据的复盖率为70%。因此,滚动轴承重货车起动单位基本阻力选用3.5N/kN更合适。

这一结论除北京铁路局在京秦、丰沙大重载列车牵引试验中已得到证实外,郑州铁路局于1992年8月14日在郑州~广水间组织的5000t重载列车牵引试验也得到了证实。该次试验由SS<sub>4</sub>0051号电力机车牵引64辆、5105t重煤车,其中滚动轴承车辆为48辆,滑动轴承车辆为16辆,滚动轴承车辆占全列3/4。列车起动试验地点为新安店站出站后927km处,坡道 $i=6\text{‰}$ ,曲线 $R=0$ ,计算单位基本起动阻力为:

$$\frac{3}{4} \times 3.5 + \frac{1}{4} (3 + 0.4 \times 6) = 2.625 + 1.35 = 3.925 \text{ N/kN}$$

起动总阻力为:

$$3.925 \times 6 \times 5105 \times 9.81 / 1000 = 499.5 \text{ kN}$$

郑州铁路局试验报告指出“该处起动牵引力为52tf、16s后全列起动、一次起动成功、全列起动时机车速度为1km/h”,52tf牵引力即510.1kN,比计算值大10.6kN,即我们常说的大1.08tf,但试验过程并未按最小起动牵引力去做。当列车全列起动时,试验车已具有1km/h速度,即列车加速度还是比较大,即便如此,试验结果也还是和理论值非常接近。

本次试验选取的C<sub>62A</sub>重货车起动基本阻力和TB1407-82牵引计算规程规定的起动基本阻力相比较其值较小。TB1407-82规定重货车单位起动阻力值为 $3 + 0.4i$ ,如果小于5N/kN时按5N/kN计算。这样的取值,与现行车辆即滚动轴承车辆所占比例越来越多的情况很不适

应,而且在坡道上的差距就很大。如  $i=12\%$  直线起动,按 TB1407-82 所规定的公式计算:

$$W_n^g = 3 + 0.4i = 3 + 0.2 \times 12 = 7.8 \text{ N/kN}$$

如果按本次试验提供的起动单位基本阻力  $3.5 \text{ N/kN}$  计算相差  $4.3 \text{ N/kN}$ ,是本次试验提供基本阻力值的  $222.8\%$ 。如果列车编组为滚动轴承车辆,其起动阻力计算就很不准了,坡道越陡相差值越大,如在  $20\%$  坡道直线部分起动时,按 TB1407-82 计算单位起动阻力应为:

$$3 + 0.4 \times 20 = 11 \text{ N/kN}$$

是本次试验提供基本值的  $314.3\%$ 。假若列车编组全部为滚动轴承车辆(这种现象在运煤线上经常出现),其起动阻力计算相差甚远,使计算更不准确,会进一步影响运输能力。

## 2 $C_{62A}$ 重货车运行基本阻力试验

### 2.1 试验条件

$C_{62A}$  型滚动轴承重货车运行基本阻力试验是在新乡~滑县南和新乡~卫辉间进行的。

试验列车由东风<sub>4</sub>3521 号内燃机车牵引,车列由 SY97245 试验车和 25 辆上述起动试验用的重煤车组成(取消守车),东风<sub>4</sub>3521 号内燃机车为无级调速机车,便于控制速度。试验是在无风、晴天、环境温度为  $3\text{C} \sim 7\text{C}$  条件下进行的,试验采样地段均为平直道,总延长为  $17.339 \text{ km}$ 。为运行基本阻力试验提供了良好条件,采样速度由  $10 \text{ km/h}$  开始,最大速度为  $100 \text{ km/h}$ 。

### 2.2 试验结果

见图 2,试验数据用最小二乘法回归整理出  $C_{62A}$  型滚动轴承重货车运行单位基本阻力公式为:

$$W_0' = 1.094 + 0.00256v + 0.000126v^2$$

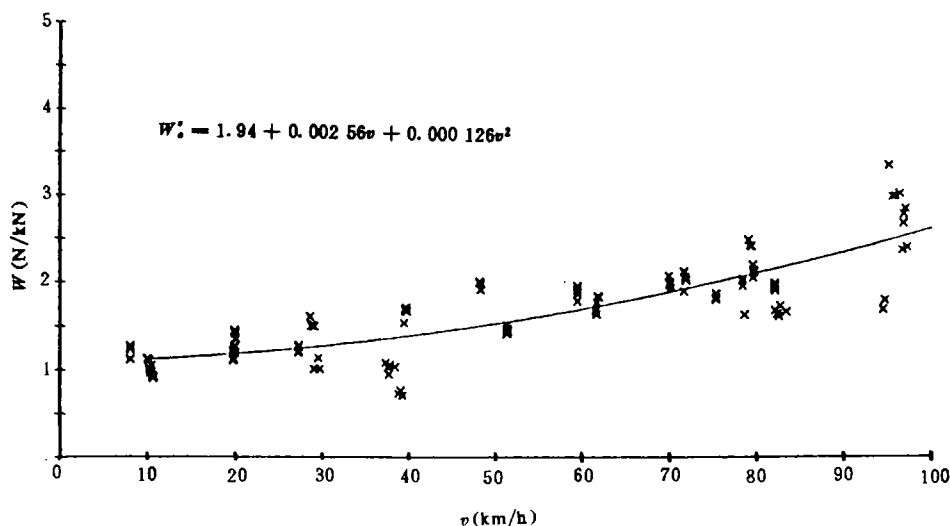


图2  $C_{62A}$  型重货车运行单位基本阻力曲线

本次试验结果和 1984 年环行铁道 C<sub>61</sub>型重货车运行单位基本阻力试验结果很接近，其与牵规及 C<sub>61</sub>型货车基本阻力比较如下表（表 1）

表 1

速度 (km/h)	牵规重货车 N/kN	C <sub>61</sub> 重货车 N/kN	C <sub>62A</sub> 重车 N/kN
10	1.10		1.132
20	1.18	0.98	1.196
30	1.32	1.270	1.284
40	1.49	1.290	1.398
50	1.72	1.504	1.537
60	1.99	1.615	1.701
70	2.30	1.814	1.891
80	2.67	2.040	2.105
90	3.08		2.345
100	3.54		2.610

从表 1 中可以看出 C<sub>62A</sub>重货车运行单位阻力 20km/h 以下较牵规所给数据大，亦比 C<sub>61</sub>型重货车阻力大；30km/h 以上较牵规所给数据小，和 C<sub>61</sub>型重货车运行单位基本阻力相近、稍大；但 30km/h~80km/h 已无大差别，如 30km/h 时，C<sub>61</sub>和 C<sub>62A</sub>运行单位基本阻力差 0.005N/kN，80km/h 时二者差 0.055N/kN，这说明无论现场试验结果还是环线试验结果基本是一致的。

3 试验结果讨论

3.1 采用本次试验的结果可简化列车起动验算

本次试验的结果使列车起动基本阻力可由原来的  $3 + 0.4i$  N/kN 变为一常数即 3.5N/kN。一般情况下，如果使用滚动轴承车辆进行牵引计算时，只要机车持续牵引力能满足列车按持续速度运行时的阻力要求，可不进行起动验算。因为机车起动牵引力是持续牵引力的 1.3~1.4 倍，本试验所得货车起动时单位基本阻力只比持续速度下的运行阻力增加 2N/kN。如 SS<sub>4</sub>型电力机车持续牵引力为 431.6kN，以持续速度（52km/h）在 6‰的坡道上运行，其牵引重量由下式计算：

$$G = \frac{1\,000F_j - P(W'_0 + W_i)9.81}{(W'_0 + W_i)9.81}$$

式中:G—— 牵引重量 (t)

F<sub>j</sub>—— 机车持续牵引力 (kN)

P—— 机车整备重量 (t)

W'<sub>0</sub>—— 机车单位运行阻力 (N/kN)

W<sub>i</sub>—— 坡道阻力 (N/kN)

W<sub>i</sub><sup>\*</sup>—— 重货车单位运行阻力 (N/kN)

则 C<sub>62A</sub> 重货车的牵引重量

$$G = \frac{1\,000 \times 431.6 - 184(3.07 + 6)9.81}{(1.568 + 6)9.81} = 5\,593.4\text{t}$$

如果按 TB1407-82 牵引计算规程规定的阻力公式进行起动验算:

$$G_q = \frac{1\,000 \times F_q - P(W_g' + W_i)9.81}{(W_g'' + W_i)9.81}$$

式中:  $G_q$ —— 起动牵引列车重量 (t)

$P$ —— 机车整备重量 (t)

$F_q$ —— 机车起动牵引力 (kN)

$W_g'$ —— 机车单位起动阻力 (N/kN)

$W_g''$ —— 货车单位起动阻力 (N/kN)

SS<sub>4</sub> 型电力机车起动牵引力为 627.8kN, 则

$$G_q = \frac{1\,000 \times 627.8 - 184(5 + 6)9.81}{(3 + 0.4 \times 6 + 6)9.81} = 5\,436.5\text{t}$$

即用现行牵引计算规程进行起动验算, SS<sub>4</sub> 型电力机车在 6‰ 的坡道上只能牵引 5 436.5t。而不能牵引 5 593.4t。这样算下来每列少牵引 156.9t。

如果用本次试验所得结果进行起动验算:

$$G_q = \frac{1\,000 \times 627.8 - 184(5 + 6)9.81}{(3.5 + 6)9.81} = 6\,547\text{t}$$

起动验算结果可满足牵引 5 593.4t 的要求, 即如前所述, 只要使用滚动轴承车辆, 牵引计算时只要满足持续牵引力即可, 从而简化了牵引计算。

### 3.2 本次试验为坡停起动提供了良好的操纵办法

本次 C<sub>62A</sub> 型重货车起动阻力试验, 在不同坡道上全部采用抻钩起动, 其目的在于寻找列车最大的起动阻力。因为这种起动方式车钩间隙最小, 起动时列车冲动也小, 使列车近似刚性起动, 车钩力最小, 在大坡道起动时不易造成车钩损坏, 进一步提高了列车运行的安全性。此外, 本次试验采用的起动方式, 列车起动阻力远小于机车最大起动牵引力, 可减缓对乘务员的心理压力。如上所述, SS<sub>4</sub> 型电力机车在 6‰ 坡道上可牵引 5 593.4t 货物列车 (持续牵引力限制), 而在 6‰ 坡道上 SS<sub>4</sub> 型电力机车用最大起动牵引力计算, 可牵引起动 6 547t 货物列车, 因此最大牵引力可起动的牵引吨位比持续功率规定的牵引吨位大 953t, 高出 14.6%。也就是说 SS<sub>4</sub> 型电力机车牵引 5 593t 货物列车, 在 6‰ 坡道上起动时, 牵引电机电流只要到达电机最大电流的 85.4%, 列车就可起动。SS<sub>4</sub> 型电力机车最大起动电流为 1 200A, 在上述地点起动只需牵引电机电流 1 025A, 司机在操纵机车时可做到从容不迫, 缓慢地将电流升到 1 000A 左右列车即可起动, 不必要用最大牵引力去强迫加速, 这样可减少机车空转, 降低撒砂量对保护机车和钢轨都非常有利, 特别是不使用最大起动牵引力, 减少了大电流对牵引电机的冲击, 减少牵引电动机的发热, 进一步延长牵引电动机的寿命。同时, 由于作用于牵引齿轮和轮对上的力相对减少, 对保护牵引齿轮和轮对均有好处。

### 3.3 采用滚动轴承车辆可进一步提高牵引重量

由于采用滚动轴承车辆后, 列车基本运行阻力实际上要比 TB1407-82 牵引计算规程所规定的基本运行阻力小, 因此在相同机型、相同运用区段可进一步提高列车牵引定数。滚动轴承货车单位基本运行阻力与 TB1407-82 牵引计算规程所规定的重货车单位基本运行阻力比

较,在10km/h到100km/h对应速度下相差0.22N/kN~0.93N/kN。列车速度在20km/h以下时,滚动轴承车辆阻力大于TB1407-82牵引计算规程所规定的数值。30km/h~100km/h时滚动轴承阻力明显下降,其数值小于牵引计算规程规定的数值。由于列车阻力下降,在相同机型、相同线路情况下,可提高牵引定数。如SS<sub>4</sub>型电力机车,在6‰坡道上,以持续速度52km/h运行,使用滚动轴承车辆其牵引重量可达5 593.4t,而使用牵引计算规程规定的计算方法计算出的牵引定数为5 436t。即采用滚动轴承车辆,SS<sub>4</sub>型电力机车在6‰坡道上可多拉157.4t。如果装载系数按0.7计算,则每列车可多拉货物157.4×0.7=110.2t。每天繁忙干线按80对货物列车计算,每天可多拉货物为110.2×80=8 816t。全年可多运货物为8 816×365=321.8万吨。由此可知,随着滚动轴承车辆的不断增加,无需做其他改变就可多运货物,其运力增长潜力将相当可观。

### 3.4 机车持续牵引力应更接近粘着限制

由于滚动轴承货车起动阻力的减小,持续牵引力已成为限制牵引重量的关键数据,因此设计新型货运内燃、电力机车时,机车持续牵引力越接近粘着数据,其牵引重量亦越大。如8K型电力机车和SS<sub>4</sub>型电力机车牵引功率均为6 400kW,8K型电力机车持续牵引力为48tf即471kN,而SS<sub>4</sub>型电力机车持续牵引力为44tf即431kN。两种机车如按TB1407-82规定的货车阻力计算,均受到起动牵引力的限制,在6‰坡道上重量均为5 436.5t。然而采用滚动轴承车辆时,两种机车在6‰坡道上牵引重量则不相同。SS<sub>4</sub>型电力机车在6‰的坡道上牵引重量为上述的5 593.4t,而8K型电力机车在6‰坡道上牵引重量为:

$$G = \frac{1\,000F_j - P(W_0' + W_i)9.81}{(W_0'' + W_i)9.81}$$

$$= \frac{1\,000 \times 471 - 184(2.91 + 6)9.81}{(1.568 + 6)9.81} = 6\,125.9t$$

两种机车的牵引重量相差9.52%。如果用8K型电力机车换下SS<sub>4</sub>型电力机车在一切不变的情况下等于每10趟车多开0.952趟车。若用8K型电力机车每天开行80列货物列车,则等于SS<sub>4</sub>型电力机车牵引开行87.616列,每列按5 593.4t计算,则每天多牵引

$$5\,593.4 \times 7.616 = 42\,599.3t$$

若装载系数按0.7计算,则每天可多运货物29 819.5t,全年365天则多运货物1 088.4万吨,等于一条单线铁路的运量,这个数字是惊人的。因此在研制新型货运机车时,应尽量考虑使持续牵引力接近粘着限制线,以最大限度的发挥机车牵引力。

### 3.5 修改牵规已是当务之急

综上所述,随着车辆的滚动轴承化,车辆的起动阻力和运行阻力发生了很大变化,现行牵引计算规程给出的数据已不适应变化了的铁路装备,给新线建设、旧线改造带来了困难,使既有线运输能力的发挥受到影响,因此修改牵规已成当务之急。

## Study and Test on the Resistance of Roller Bearing Wagons

Wang Zhen

(China Academy of Railway Sciences)

**Synopsis:** The paper has compared analysis and discussion the data obtained from experiments on the starting resistance of loaded wagons with roller bearings and the basic resistance testing of the tractive unit with the calculated results based on the current "Rules and Regulations on Traction Calculation of Train Work". It is pointed out in the paper that the "Rules and Regulations on Traction Calculation of Train Work" should be revised as early as possible so as to make full use of the potentials of existing railway equipment and to further raise railway traffic capacity.

**Key Words:** rules and regulations on traction calculation of train work, wagon with roller bearing, train resistance