

单车运动中的功率和踏蹬力问题

The power output and muscle strength requirements on elite cycling.

张百鸣

香港体育学院

本演讲的概要：

(壹) 单车力量问题的背景。

(贰) 生物力学研究方法介绍。

(叁) 不同单车项目的力量特征分析。

(肆) 理论总结。

(壹) 问题的提出:

单车训练比赛中的专项力量特征?

1) 专项力量的大小?

2) 专项力量的变化规律?

3) 与专项力量相关的因素?

a 项目特点, **b** 频率要求,
c 传动系数, **d** 功率能力。

内地教练对单车训练专项力量的观点:

- 1) 短距离: 力量型项目; 主要进行大力量训练。(有的直接从举重运动员中选拔)
- 2) 中长距离: 耐力型项目; 主要进行耐力训练。

内地单车运动员力量训练的调查：

短距离运动员的深蹲力量训练全部达到**180**公斤，极限的达到**230**公斤。

中长距离很运动员大多没有专门力量训练。

对日本短距离单车教练的调查：

日本短距离运动员的力量训练量一般为100公斤，极限为130公斤。

国际上已有的有关研究成果:

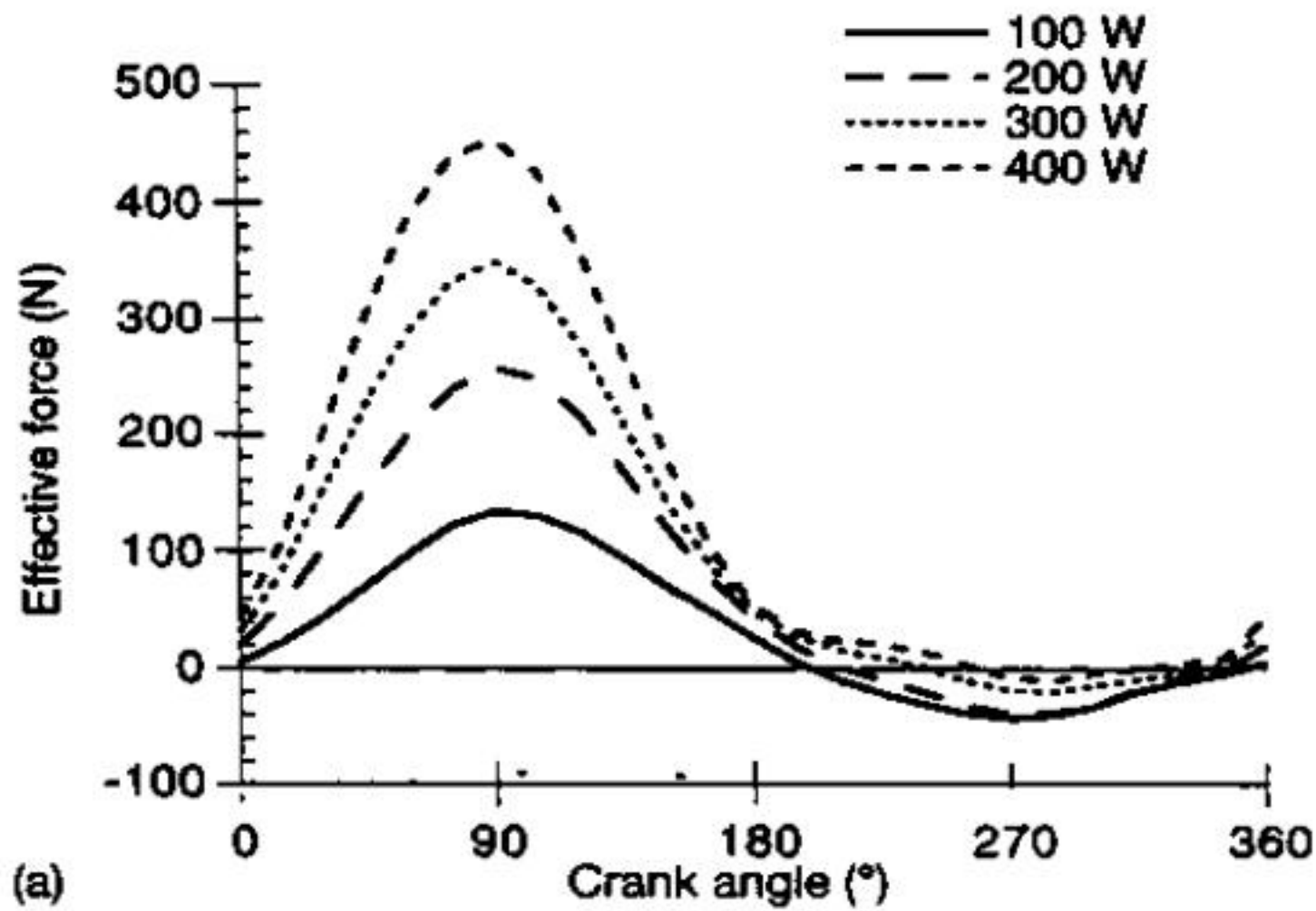
1. DAVID J. SANDERSON, et al
Journal of Sports Science,
2000,18,173-181

Cadence: 60, 80, 100

Power: 100, 200, 300, 400

Time: 2min.

The max force : 450(N)



(a)

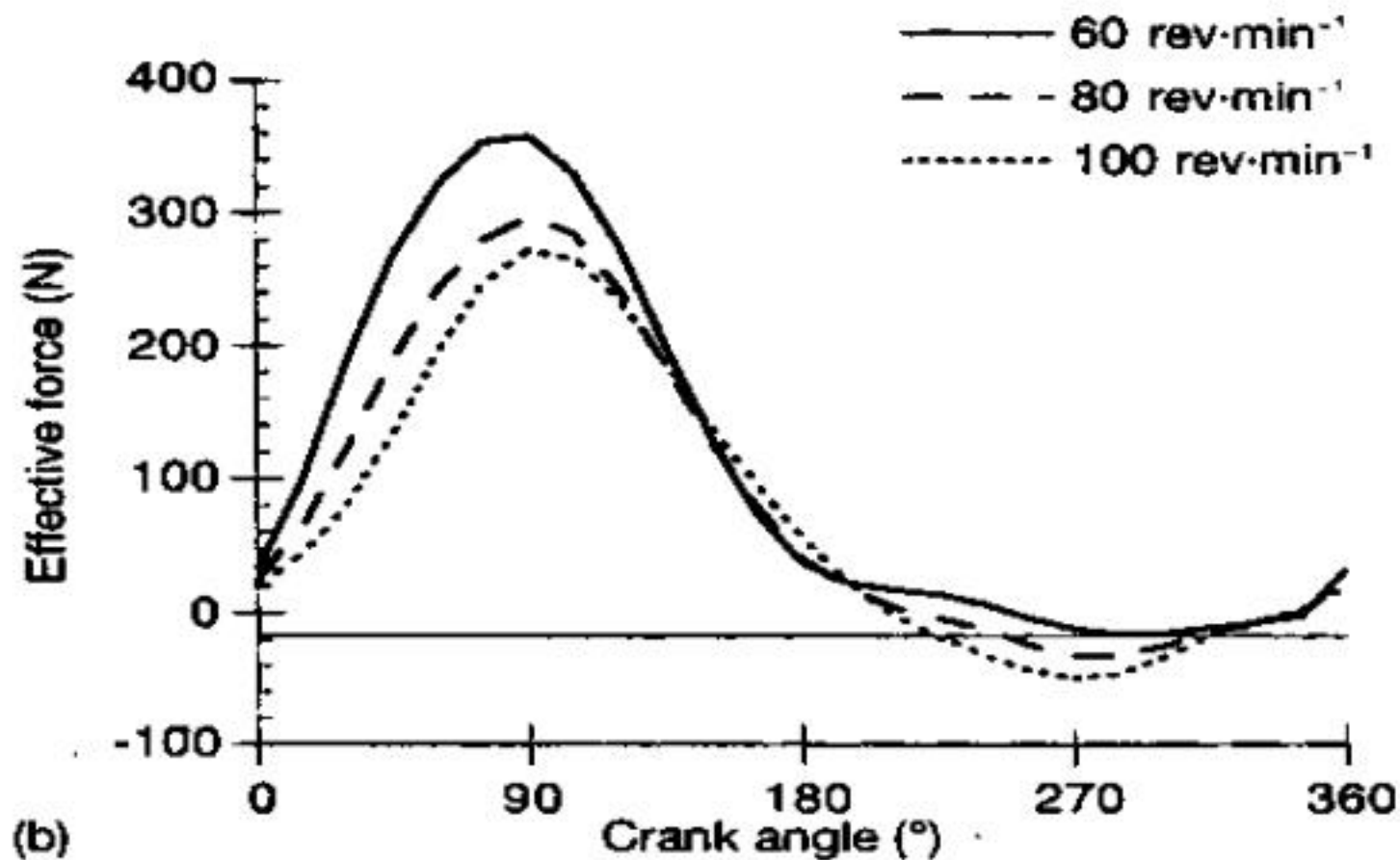


Fig. 1. Mean effective force with respect to crank angle averaged across groups as a function of (a) power output and (b) cadence. The effect force is the component of the resultant pedal force applied at right angles to the crank.

2. DAVID J. SANDERSON, et al

Journal of Sports Science,

2003, 21, 191-199

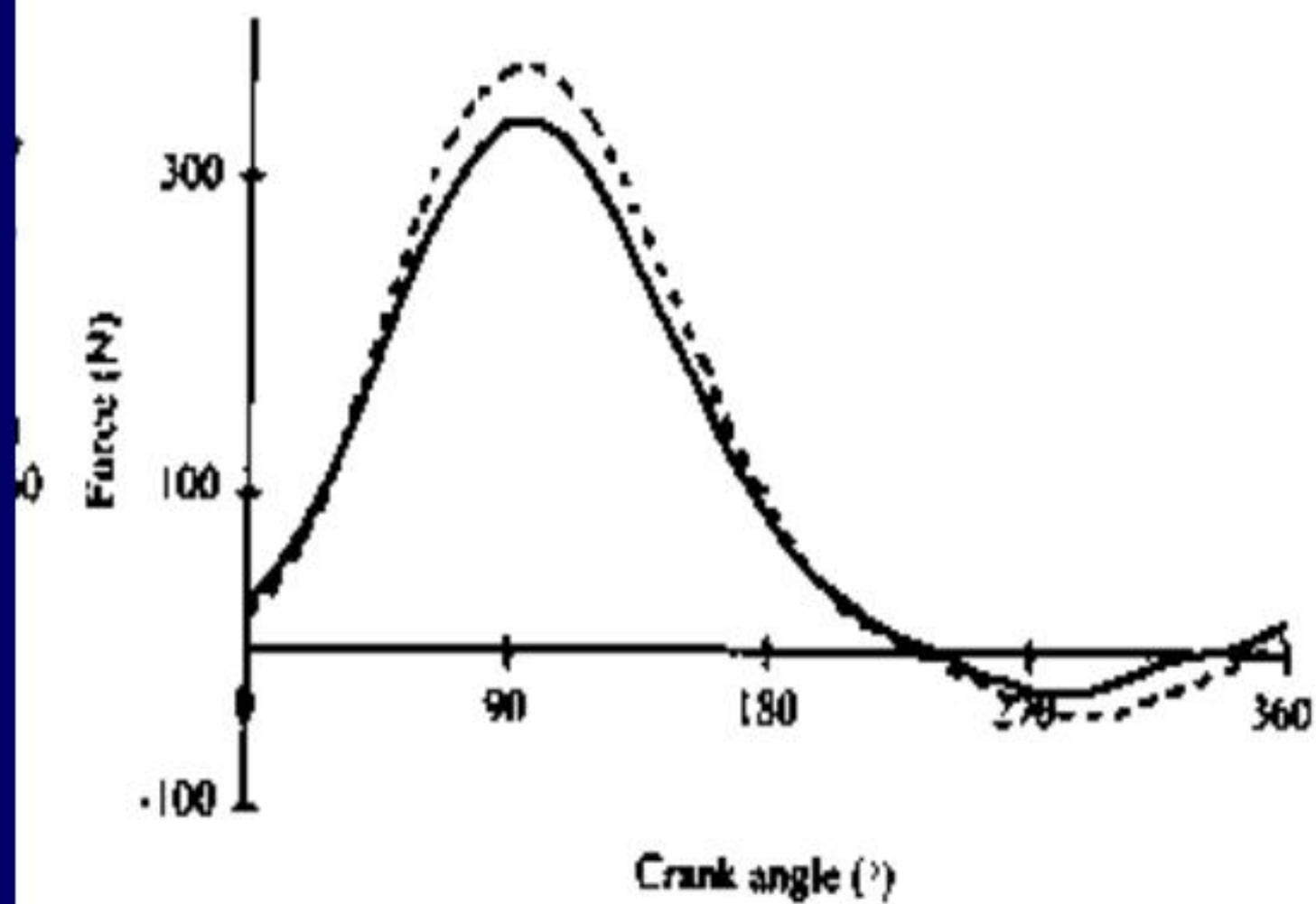
Cadence: 90

Power: 80% max power (413)

Time: no longer keep 90/min.

The max force : 377(N)

(c)



3. TETSUO TAKAISHI, et al
Medicine & Science in Sports &
Exercise. 1998, Mar, 442-449

Cadence: 45, 60, 75, 90, 105

Power: 0, 100, 150, 200

Time: 2, 5, 5, 5 min

The max force : 350-470(N)

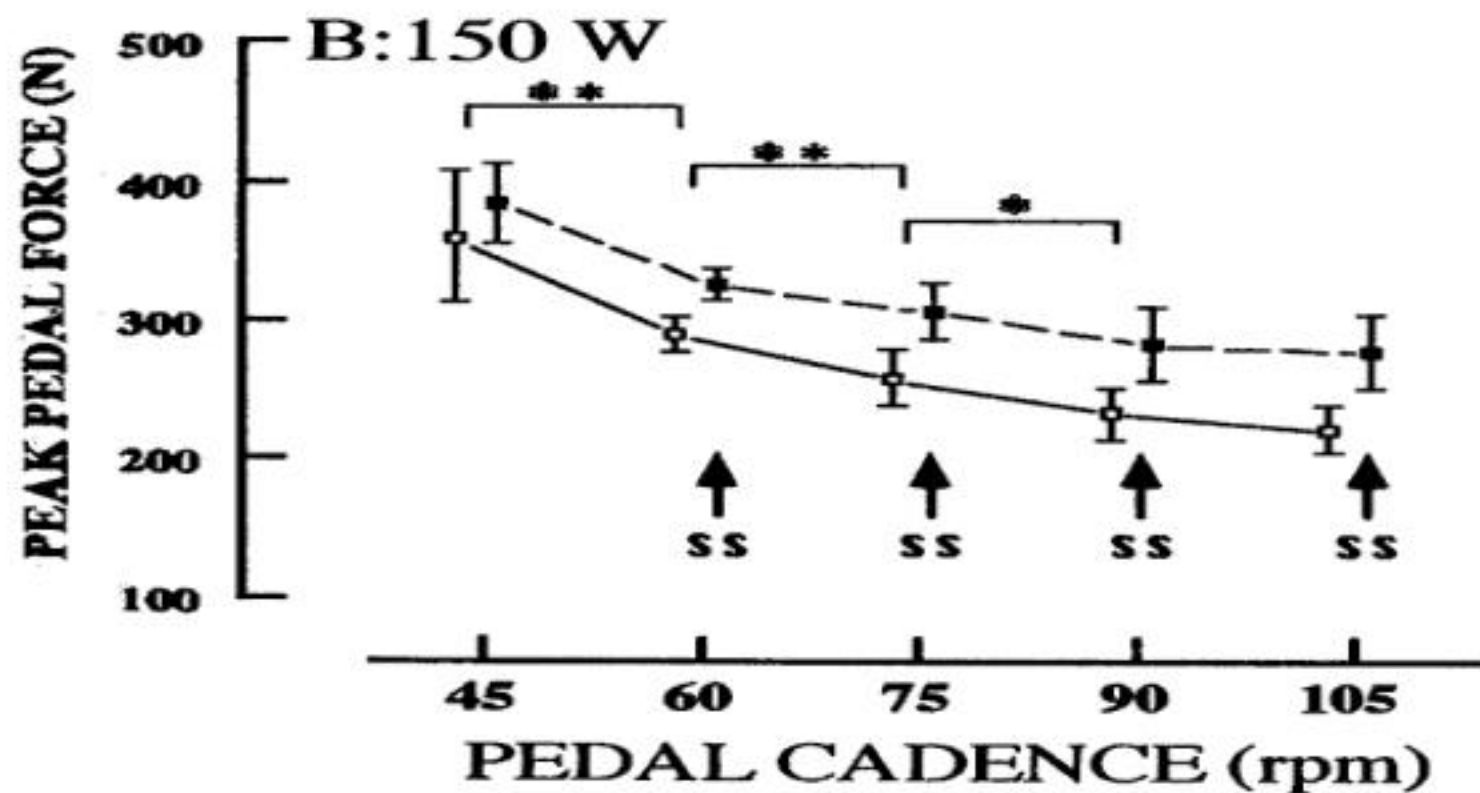
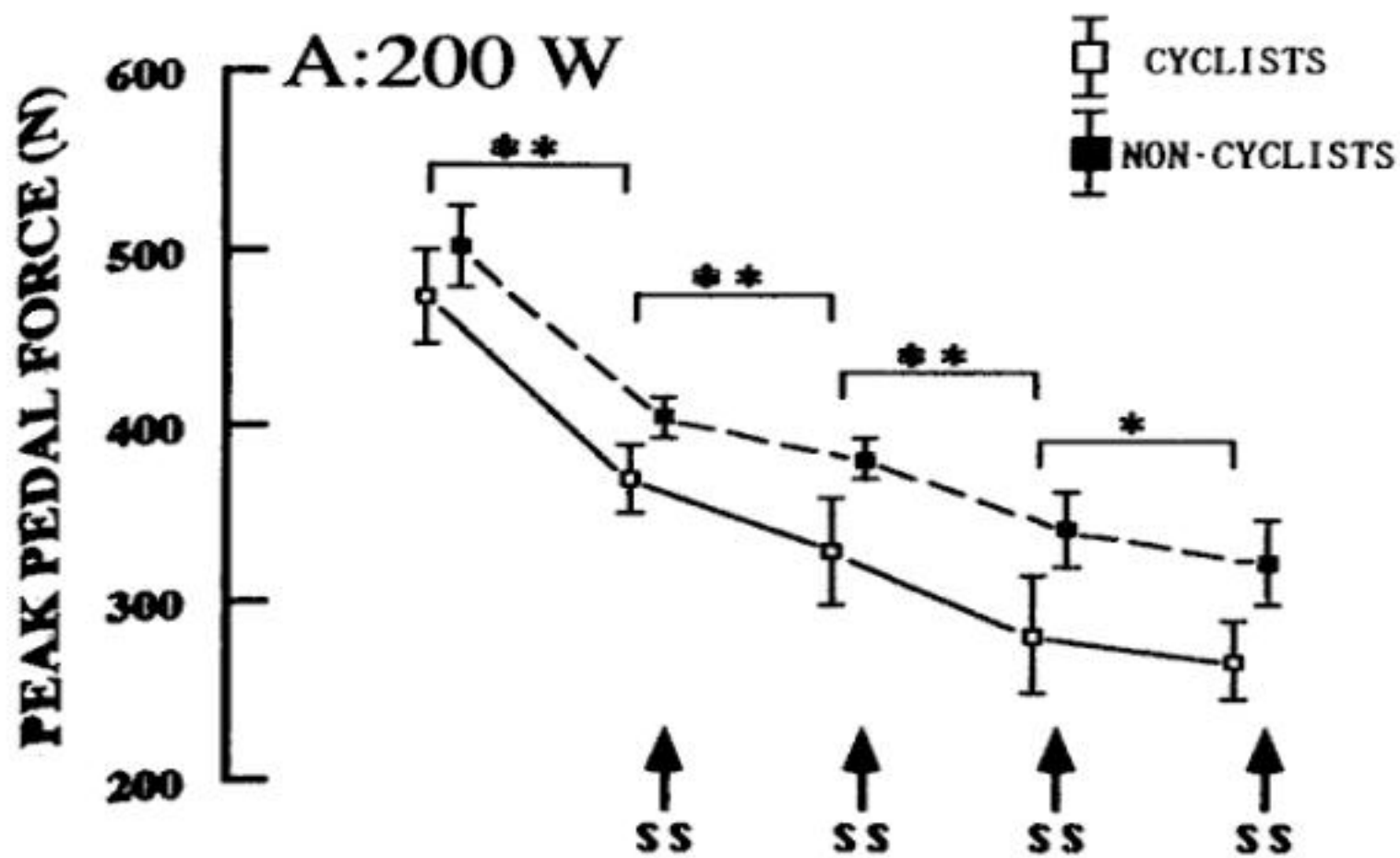


Figure 2—Relationship between means of peak pedal force and cadence for cyclists (□) and noncyclists (■) during pedaling at 200 W (A) and 150 W (B). Vertical lines indicate standard deviations. Open asterisks and closed asterisks show significant difference in values among cadences for cyclists and noncyclists, respectively. Open and closed asterisks, $P < 0.05$. SS indicates significant difference in values between cyclists and noncyclists at each cadence ($P < 0.01$).



4. TETSUO TAKAISHI, et al
Medicine & Science in Sports &
Exercise. 2002, Mar, 442-449

Cadence: 45, 60, 75, 90, 105

Power: 0, 100, 150, 200

Time: 2, 5, 5, 5min

The max force : 40(kg)

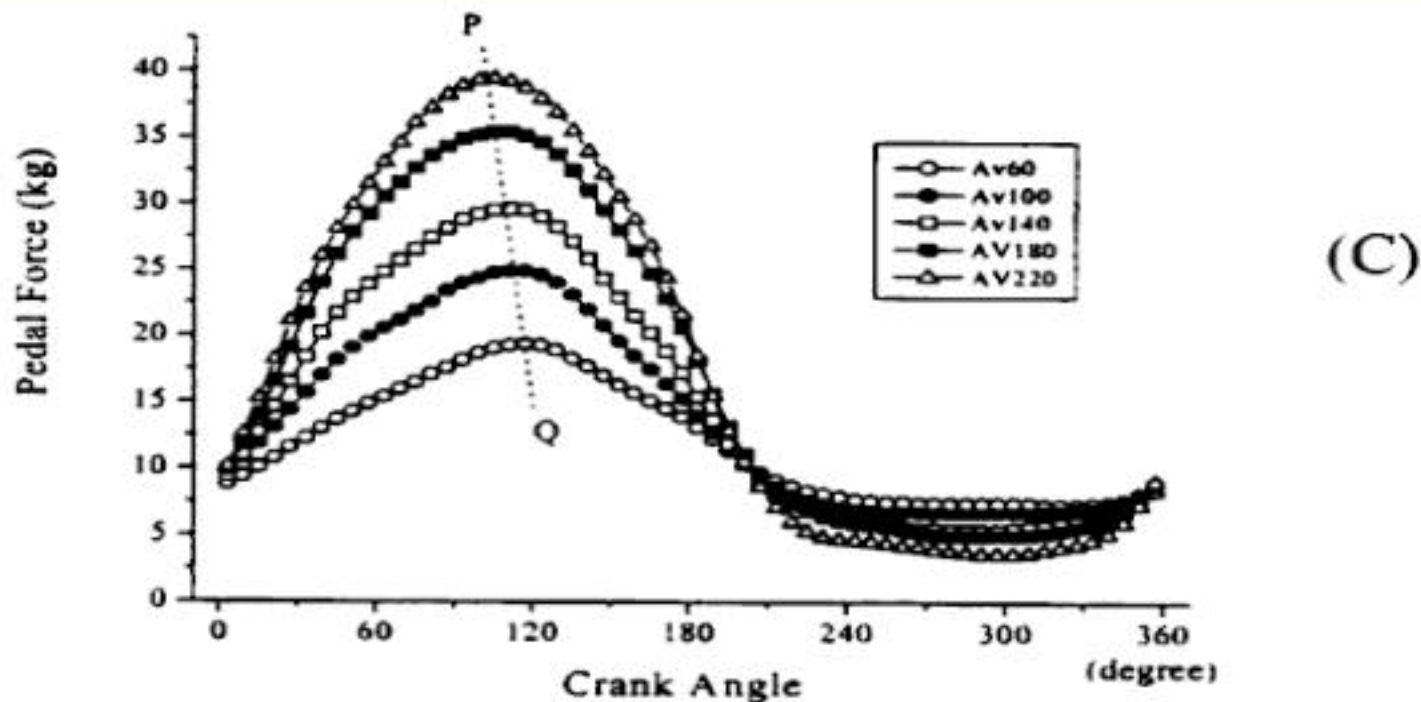


FIGURE 4—The relationship between means of changes in normalized muscle blood volume (panel A), normalized oxygenation level (panel B), and averaged pedal force (panel C) during MAIN-trial against crank angle. *Vertical bars* indicate SD. For ease of presentation, crank angles for each parameter were graphically represented beginning at 3 degrees and increased by 6 degrees. *Asterisk* in muscle blood volume (panel A) indicates significant differences of the values at 225–243 degrees against those at 285–297 degrees for the work at 220 W.

这些研究的启示:

- *最大力范围在350-500牛顿之间。没有给出平均力值。
- *全部都是在实验室ERGO条件下做出的。
- *以生理研究为目的，踏蹬力为生理负荷辅助指标。

(貳) 单车运动的运动生物力学分析

(A) 单车前进的动力来源:

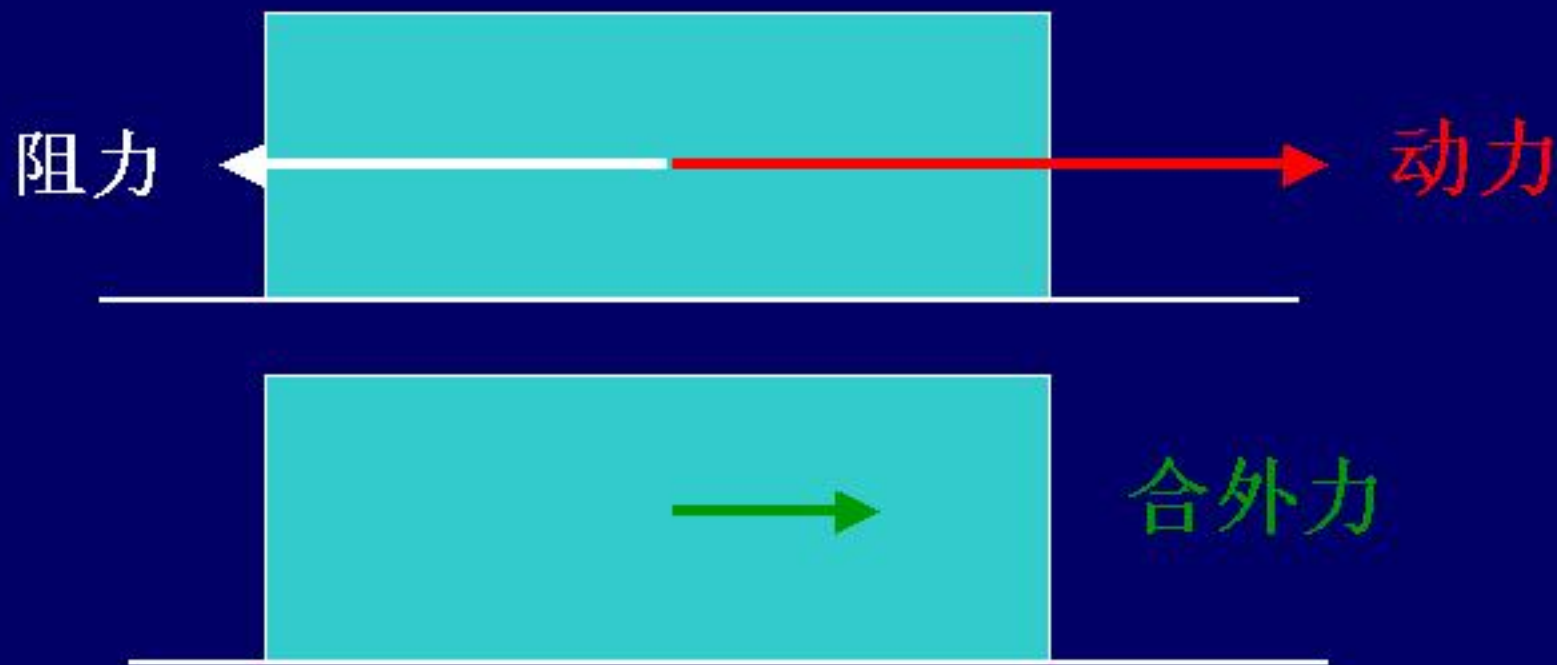
- 1) 运动员施与单车曲柄上的力通过牙盘链条和后轮作用到地面。
- 2) 顺风时的风力（相对速度为正时）。
- 3) 下坡时重力的下滑分力。

运动训练重点考虑运动员对单车的作用力。

(B) 单车前进的阻力:

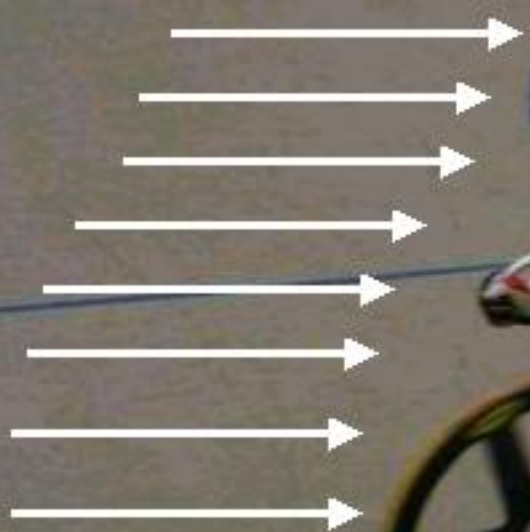
- 1) 风的阻力。
- 2) 车轮与地面的摩擦力。
- 3) 车内部的机械摩擦力 (轴, 链条)。
- 4) 上坡时重力的下滑分力。

根据牛顿定律，任何物体都是按照它所受的合外力方向运动。



这是我们讨论单车运动专项力量问题的理论基础。

阻力：风力，摩擦力



动力：踏蹬力

2005 6 13



动力：踏蹬力

阻力：风力，摩擦力

2005 6 13

动力大于阻力，合外力 >0 ，加速状态。



2005 6 13

动力等于阻力，合外力=0，匀速状态。



2005 6 13

动力小于阻力，合外力 <0 ，减速状态。



2005 6 13

动力和阻力之间的相互作用关系 (**NEWTON'S LAW**)

- 1) 动力大于阻力，人/车系统加速状态。
- 2) 动力等于阻力，人/车系统匀速状态。
- 3) 动力小于阻力，人/车系统减速状态。

因为动力和阻力的这些关系，我们首先要清楚人车系统的阻力。

对于单车阻力的研究方法

1) 风洞实验

2) SRM仪器

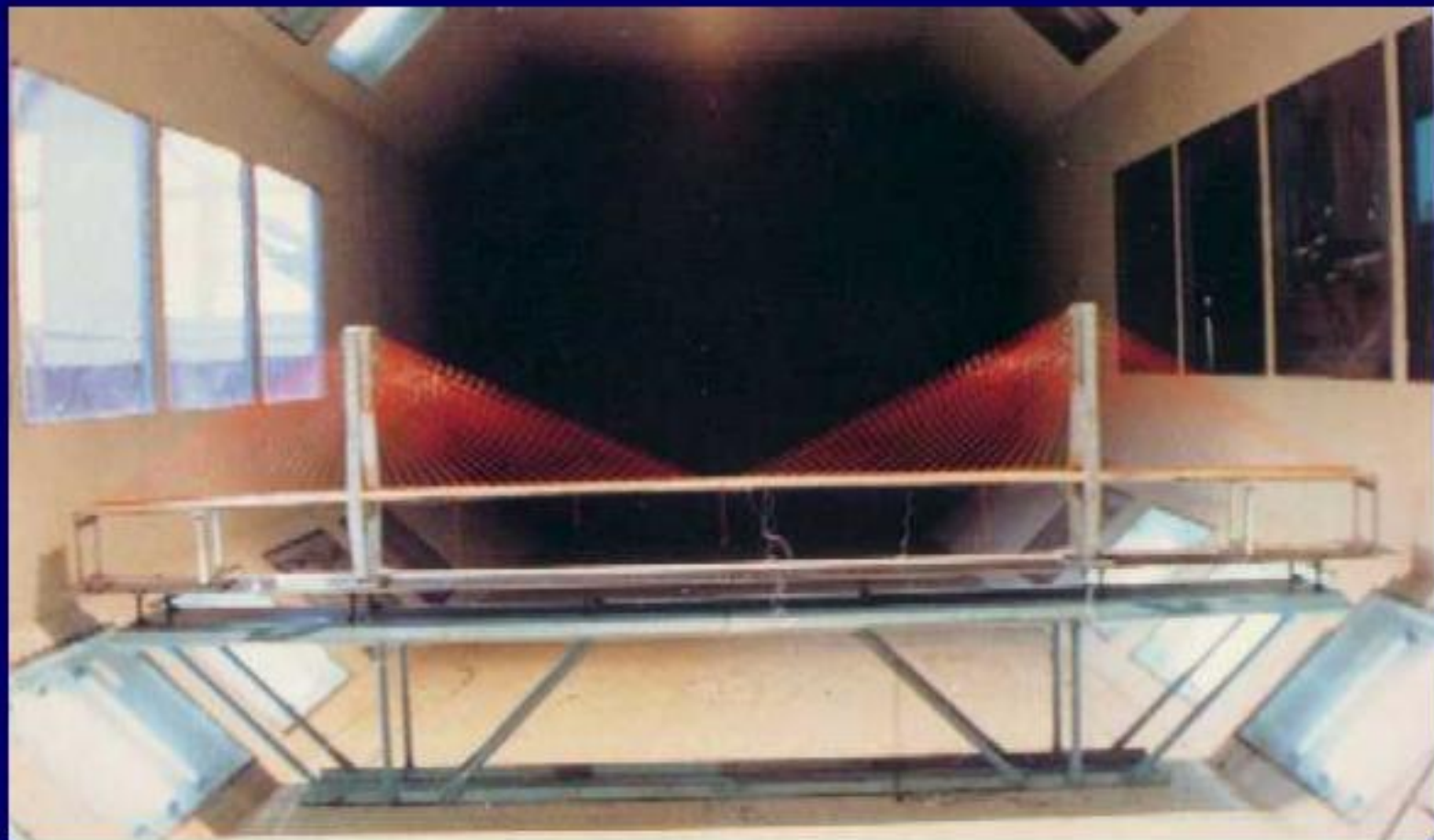
风洞

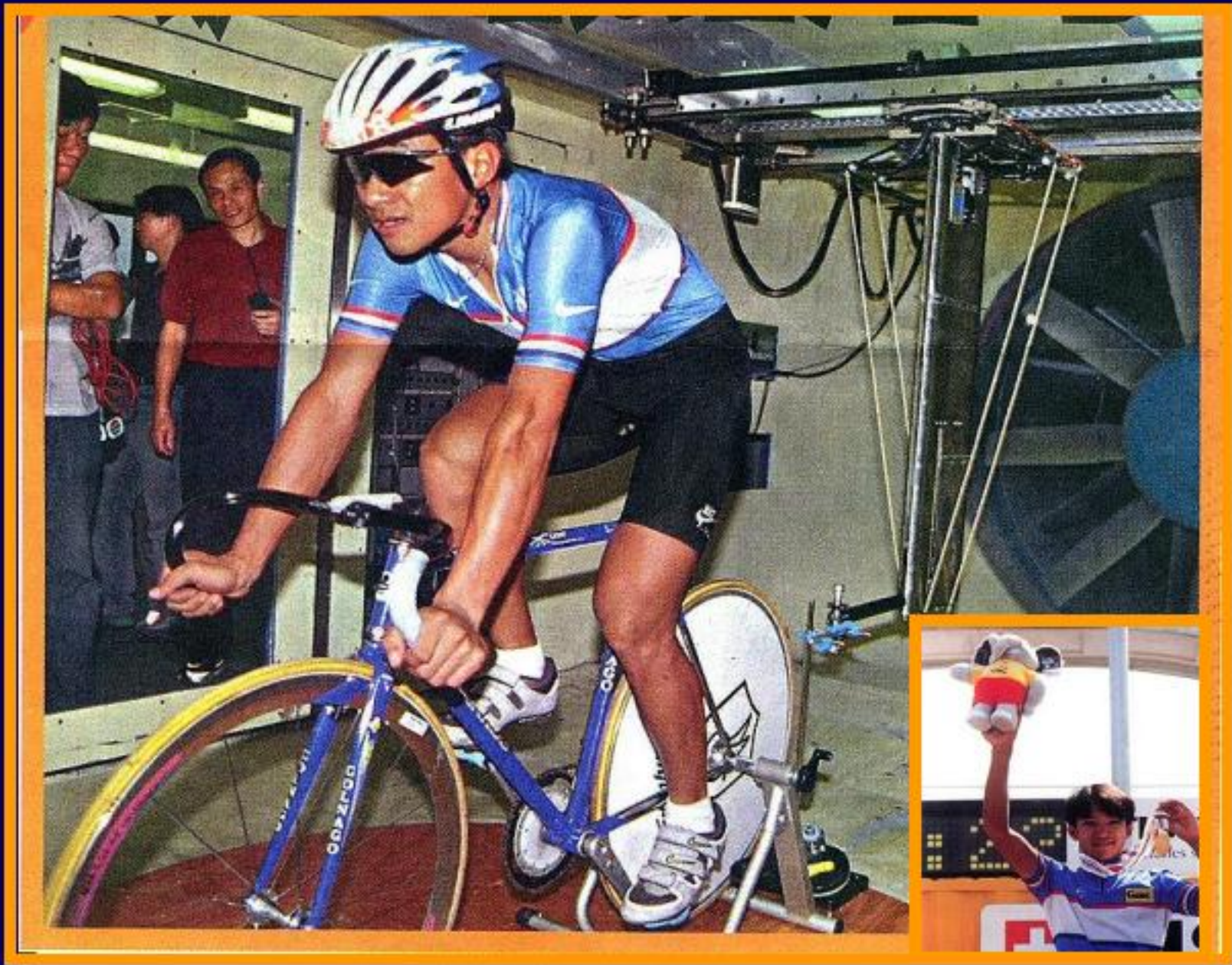


建筑实验



桥梁实验





风洞实验的局限

- *费用较高。

- *无法测量到车轮与地面摩擦力和车辆内部机械摩擦力。

- *只适用于人车系统的阻力,不适用于脚上的踏蹬力。

SRM仪器



SRM仪器

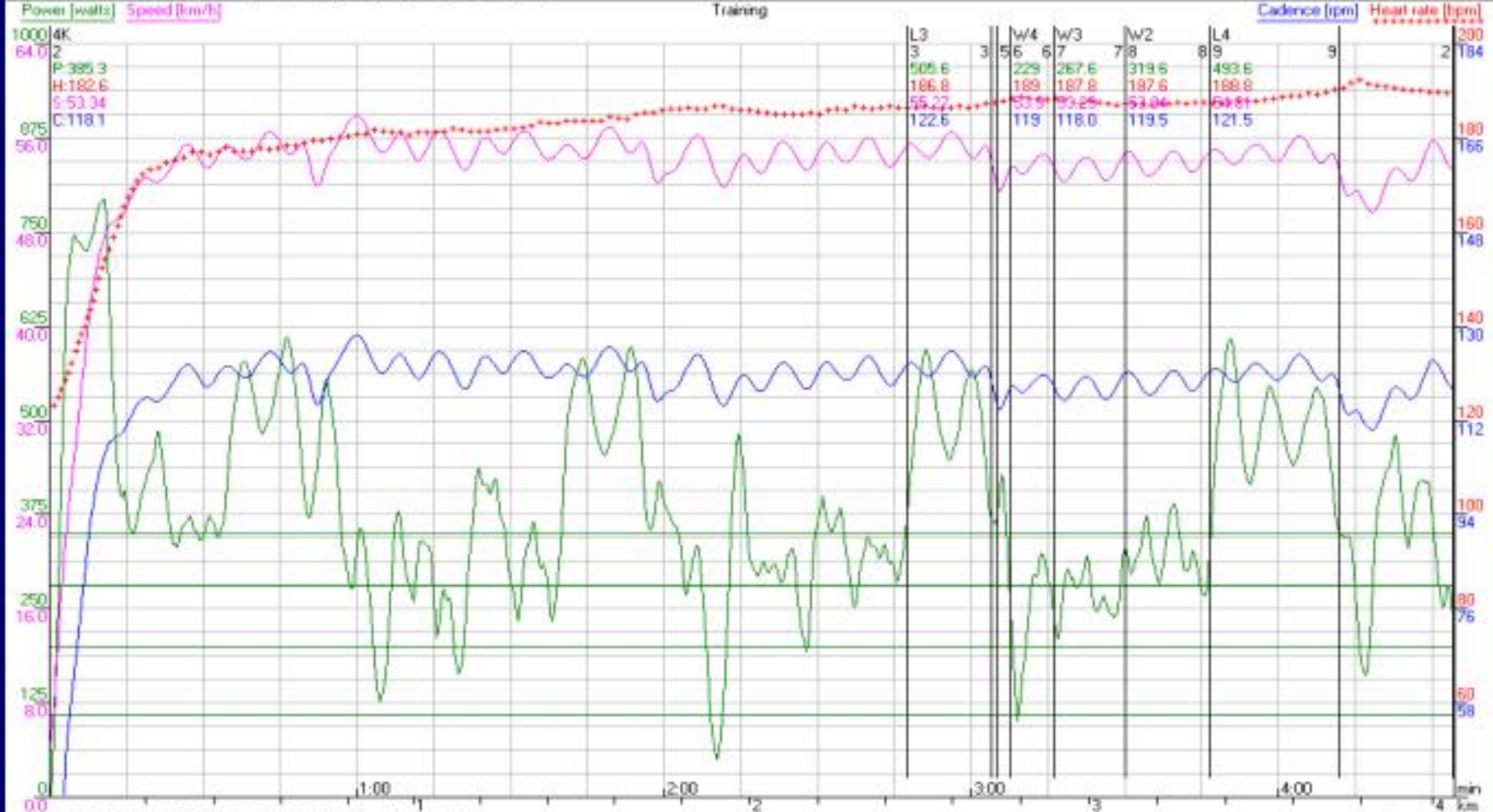


SRM仪器



SRM数据下载





26.09.01 16:58-17:03 HSL/4K 0.04h 106kJ 4km 4km TP test (2) Smoothing 1%

File Edit View Powercontrol Window Help

标准 5 watts 180 bpm 54.1 km/h 119 rpm

SRM仪器的特点

- *费用便宜。

- *可以测量到车轮与地面摩擦力和车辆内部机械摩擦力。

- *方便直接计算脚上的踏蹬力。

人车系统前进时遇到的阻力

总的阻力是多少呢？

小测试：在**50**公里/时的匀速领骑背景下，人车系统的总阻力有多大？

A: 3公斤, B: 10公斤, C: 30公斤
D: 50公斤, E: 100公斤,

第**3**棒运动员同样经历了一个加速段和一个减速段，但是，与第**2**棒运动员相比，第**3**棒运动员的加速段短，减速段长。

提高第**3**棒运动员的专项能力，同样是减少减速段的下降幅度和时间。也就是对频率**144次/分**背景下的**31.1公斤**踏蹬力的保持能力。这就是第**3**棒运动员的专项力量。

小测试：在**50**公里/时的匀速领骑背景下，人车系统的总阻力有多大？

A: 3公斤, B: 10公斤, C: 30公斤
D: 50公斤, E: 100公斤。

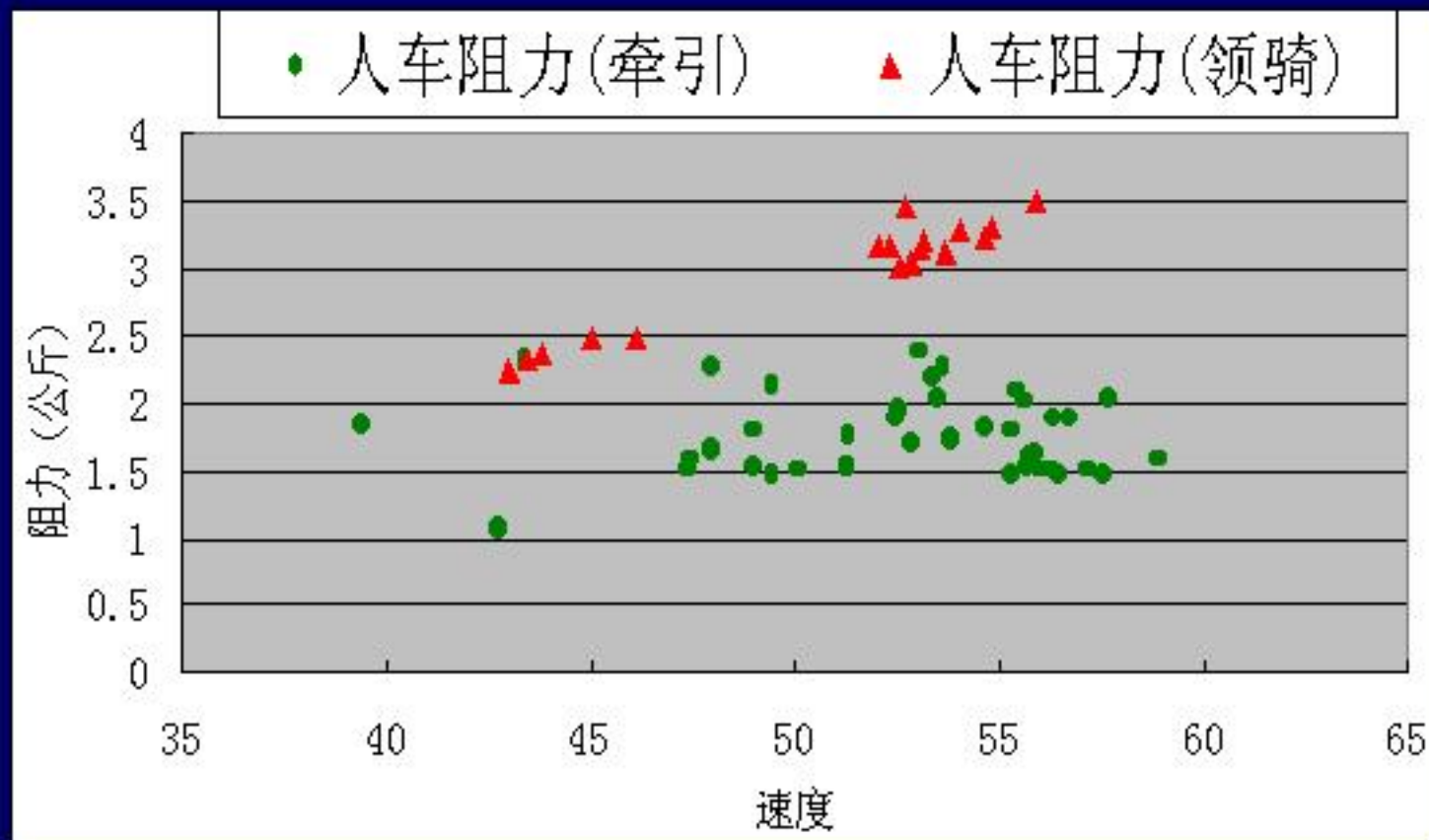
答案： A: 3公斤

影响阻力变化的因素

- *不同骑行状态：领骑与尾随。
- *运动员身材体重。
- *海拔高度。
- *地面材质。

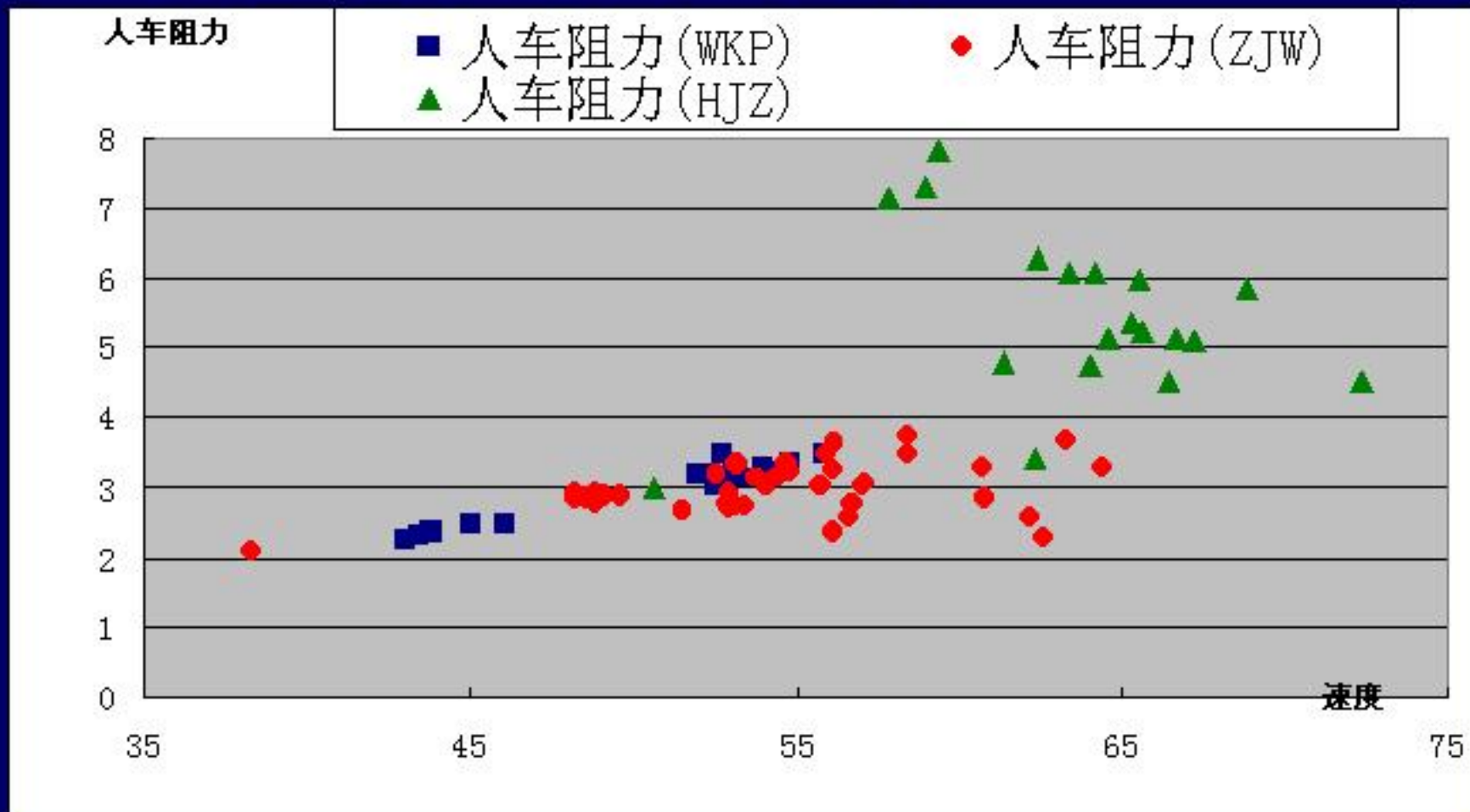
骑行状态的不同

领骑和尾随的差别



运动员身材不同

不同运动员领骑时的差别



海拔高度及场地地面材质的不同。

人车系统在不同场地的环境阻力

| 骑行状态 | 周长(m) | 海拔 | 表面材质 | 领骑(kg) | 尾随(kg) | 牵引(kg) |
|------|-------|-------|------|-------------|--------|--------|
| 南京 | 250 | 海平面 | 水泥 | 2.74 | 1.95 | |
| 深圳 | 250 | 海平面 | 木质 | 2.52 | 1.62 | |
| 昆明 | 333 | 1900m | 水泥 | 2.20 | 1.62 | 0.67 |
| 秦皇岛 | 333 | 海平面 | 水泥 | 2.44 | | |
| 香港 | 250 | 海平面 | 水泥 | 2.97 | 2.23 | |
| 科罗拉多 | 333 | 2000m | 水泥 | 2.23 | | |
| 卡里 | 250 | 1200m | 木质 | 2.32 | | |

(5名运动员, 速度取值范围在35-60公里/时)

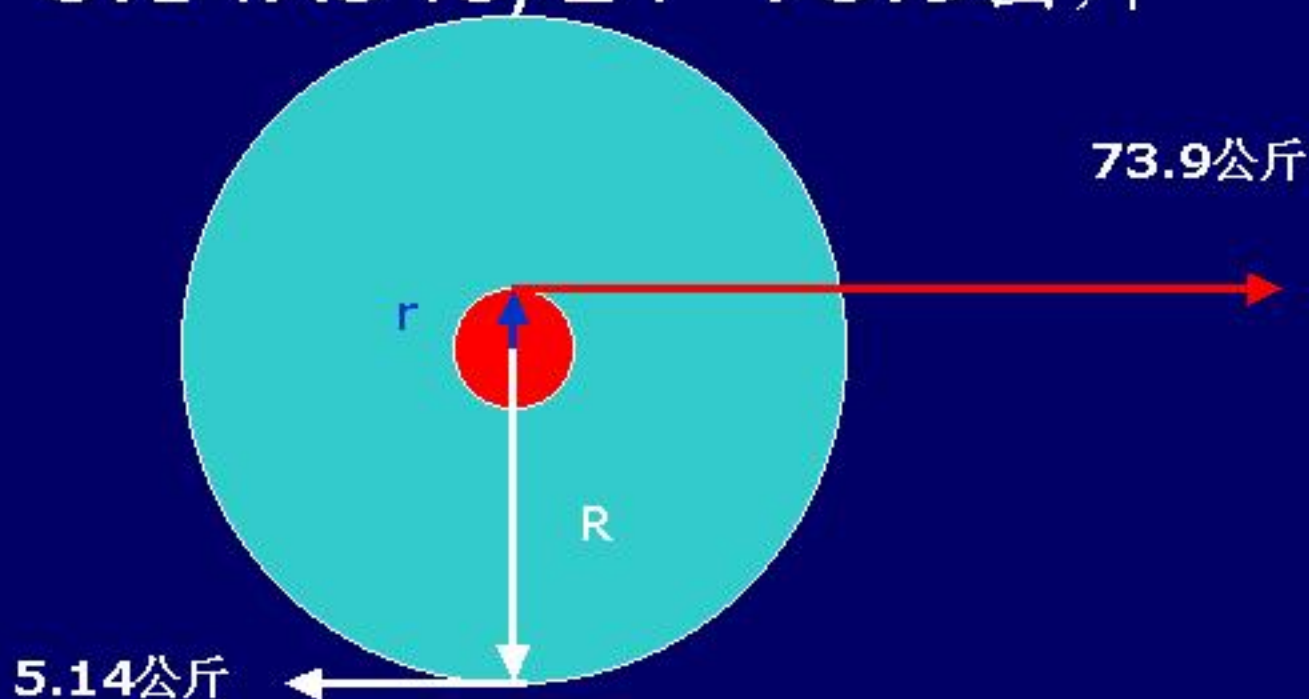
运动员脚下踏蹬动力问题

在匀速时人车系统遇到的阻力等于车后轮给予地面的动力，但是并不等于运动员脚下的踏蹬力。

运动员脚下踏蹬踏蹬力的计算。

计算方法1 (以64.55km/h, 5.14kg为例)
车轮与后飞轮的动力转换, 动量矩守恒定律。 $F \cdot R = f \cdot r$

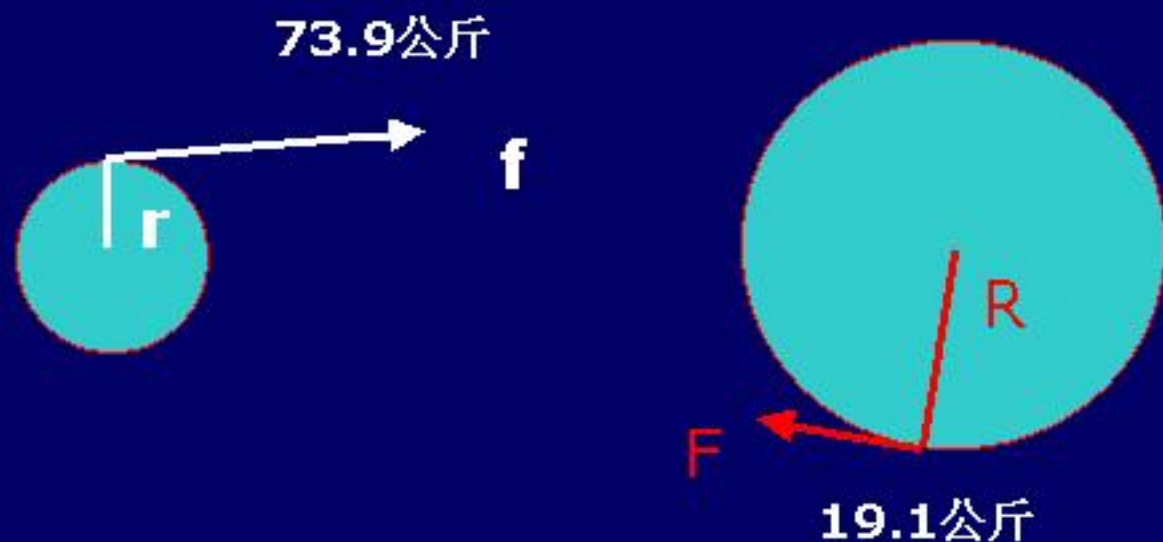
后车轮半径345mm, 后飞轮半径24mm
 $F = f \cdot r / R = 5.14 \times 345 / 24 = 73.9$ 公斤



后飞轮与前牙盘的动力转换：

后飞半径24mm，前牙盘半径93mm

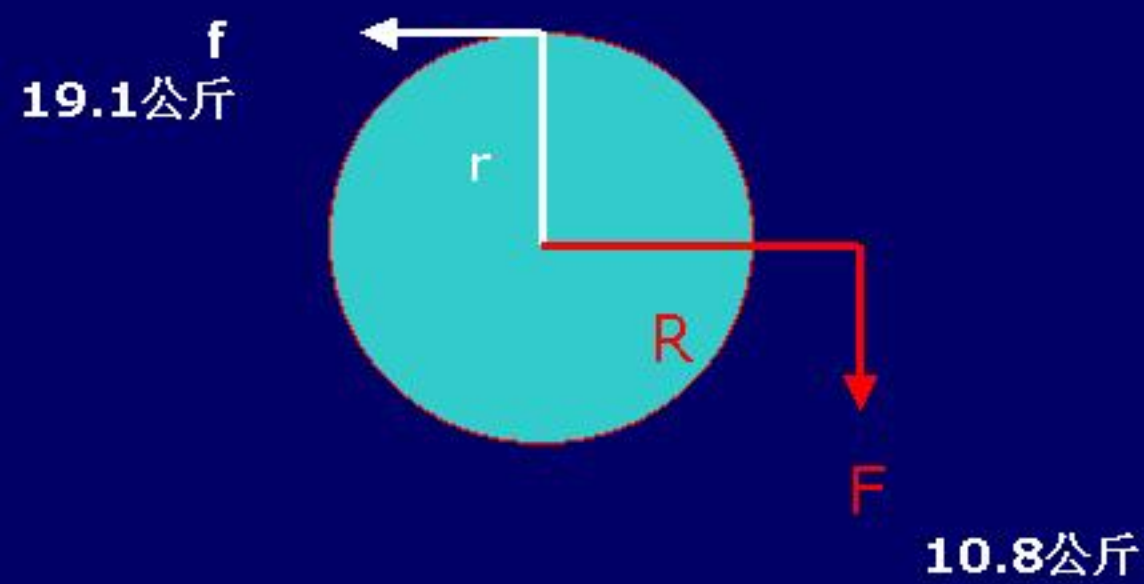
$$F=f*r/R=73.9*24/93=19.1\text{公斤}$$



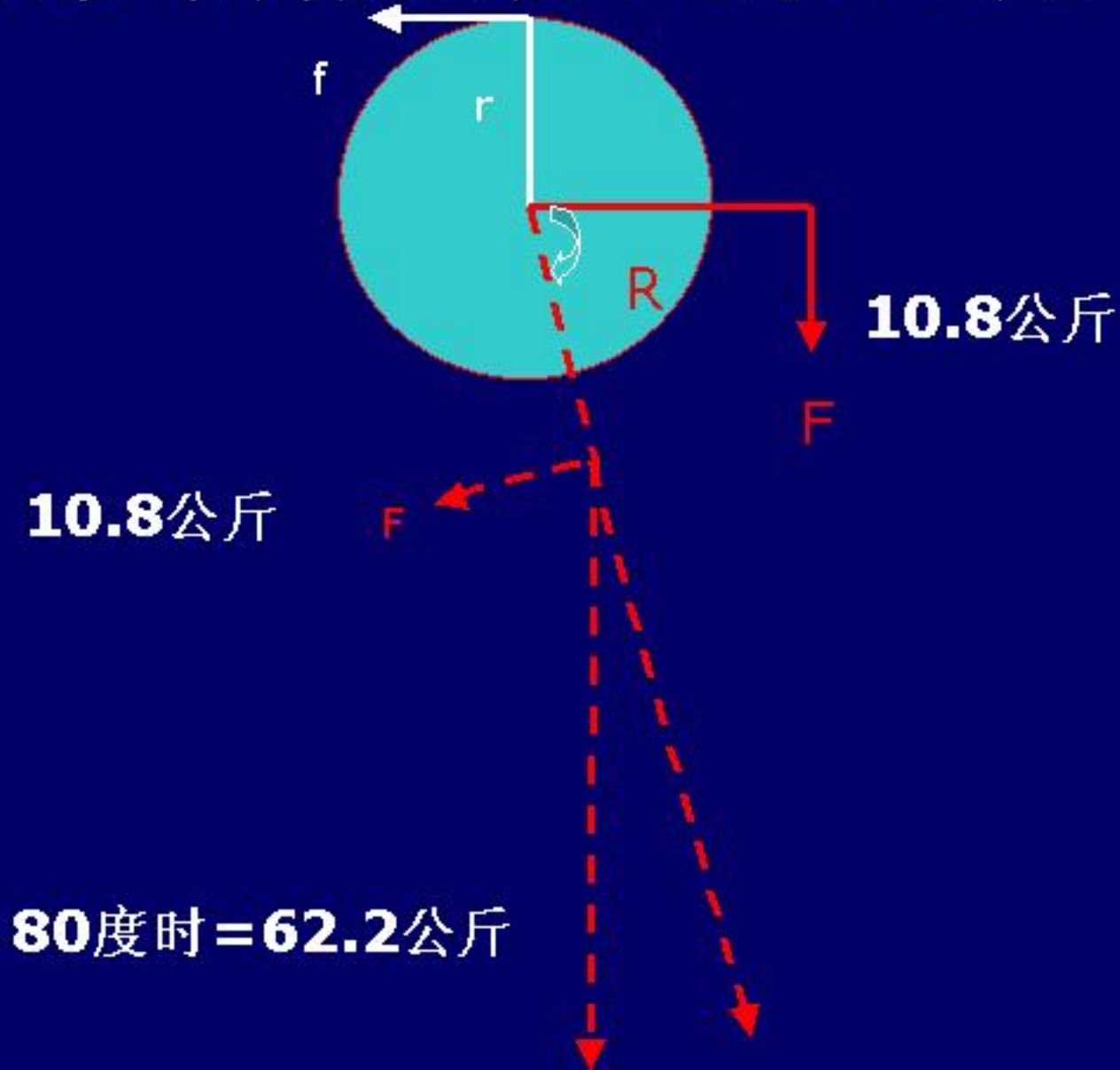
前牙盘与脚踏的动力转换：

前牙盘半径93mm，曲柄半径170mm

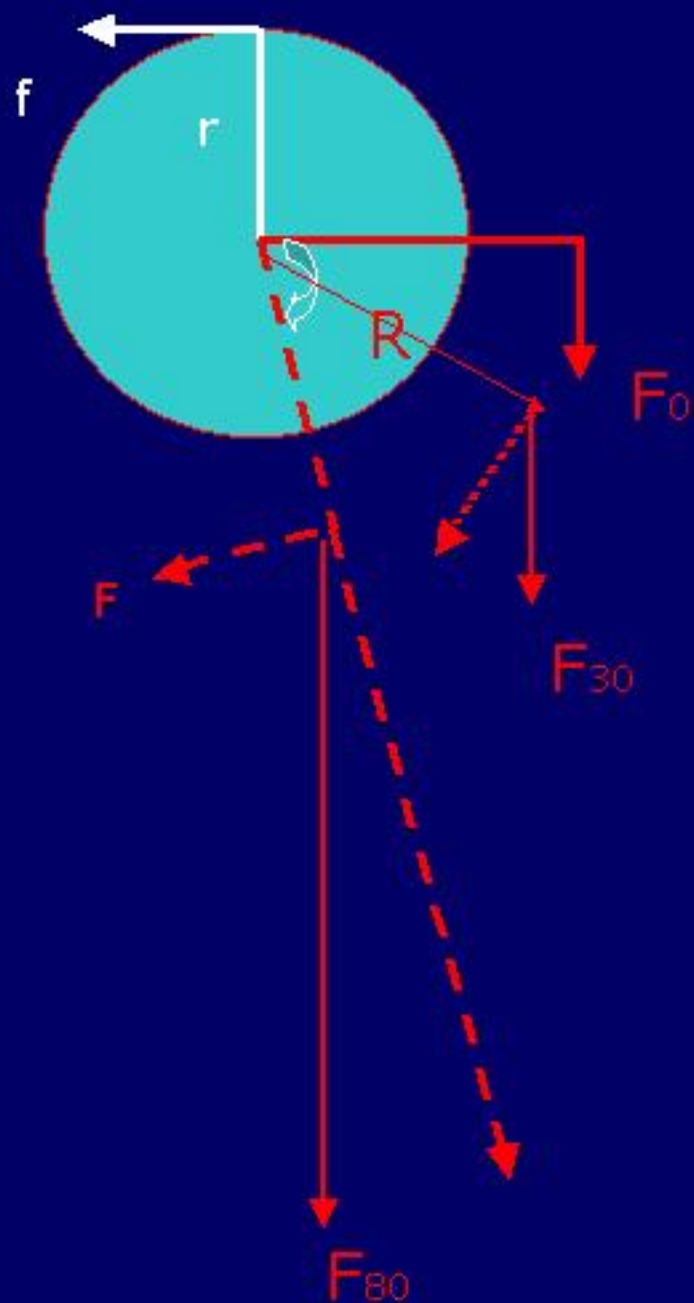
$$F = f * r / R = 19.1 * 93 / 165 = 10.8 \text{公斤}$$



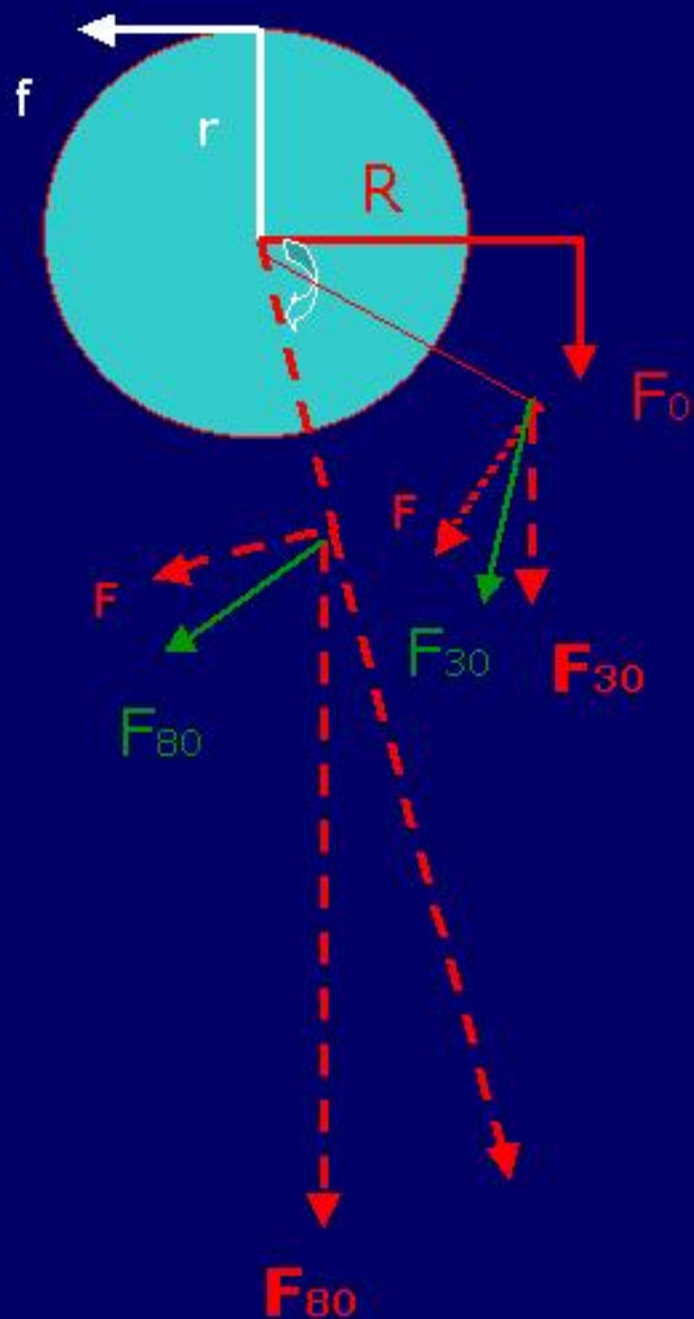
大多数情况曲柄不在水平线上



| 角度 | 力量要求 |
|------------|-------------|
| 0度 | 10.8kg |
| 10度 | 10.9 |
| 20度 | 11.5 |
| 30度 | 12.5 |
| 40度 | 14.1 |
| 50度 | 16.8 |
| 60度 | 21.6 |
| 70度 | 31.6 |
| 80度 | 62.2 |
| 平均值 | 21.3 |



前面的讨论是在骑行技术不好的情况，实际上精英运动员的技术都比较好，这样用力的方式就和前面讨论的情况大不一样。结果是平均踏蹬力小很多。



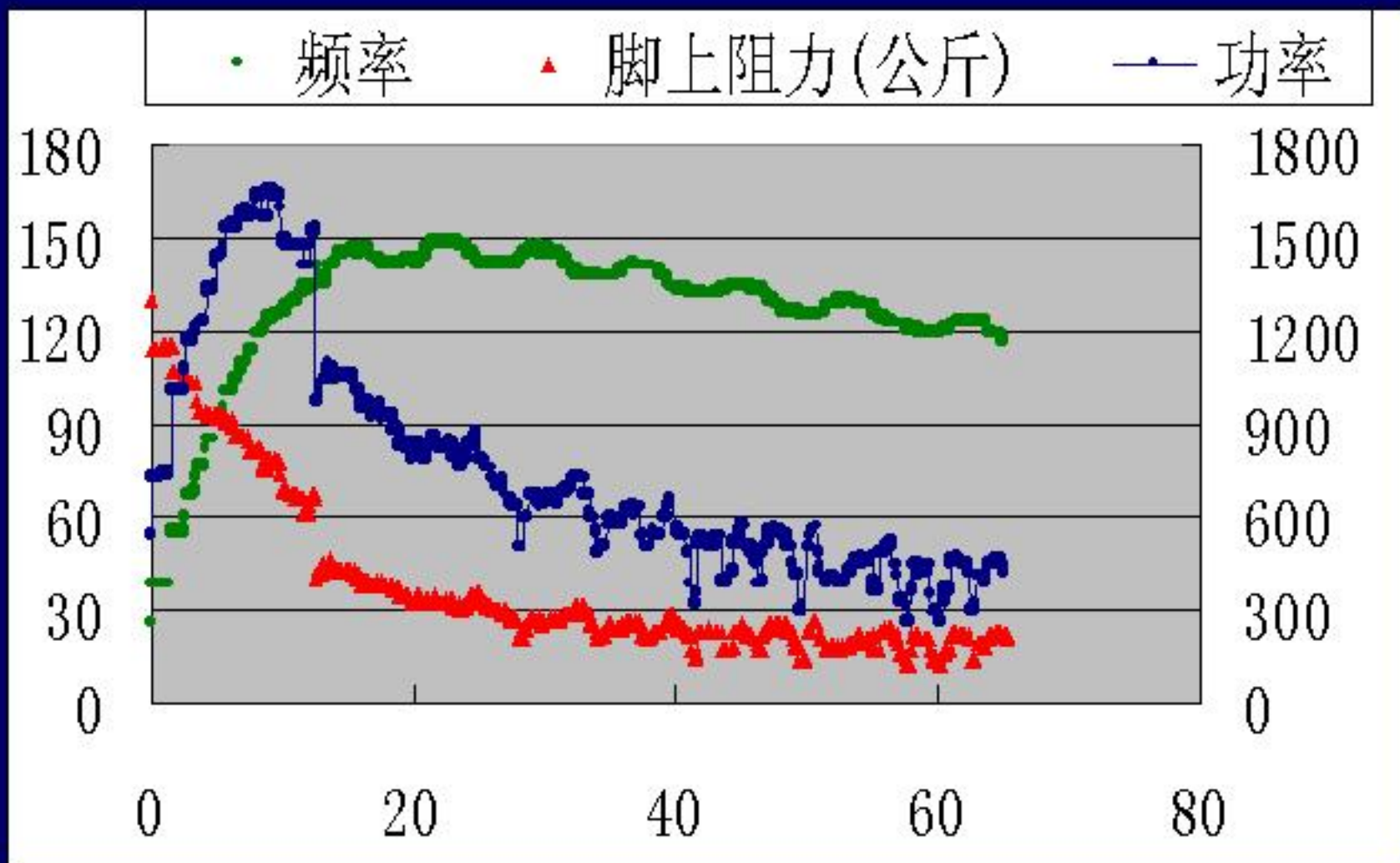
计算方法2:由功率值计算

功率=阻力X速度

由此计算出运动员脚底阻力在**匀速条件**下每一圈中的平均阻力值。

| 功率 | 车时速 | 频率 | 曲柄周长 | 脚速度 | 脚上阻力(公斤) |
|--------|-------|-------|-------|------|----------|
| 1068.9 | 62.41 | 153.4 | 1.036 | 2.65 | 41.17 |
| 1056.6 | 64.17 | 157.8 | 1.036 | 2.73 | 39.56 |
| 929 | 66.64 | 152.9 | 1.036 | 2.64 | 35.90 |
| 411.4 | 50.62 | 116.8 | 1.036 | 2.02 | 20.81 |
| 1066.5 | 65.58 | 162.6 | 1.036 | 2.81 | 38.75 |
| 578.9 | 62.37 | 144.9 | 1.036 | 2.50 | 23.61 |
| 947.5 | 65.29 | 151.1 | 1.036 | 2.61 | 37.05 |
| 815.5 | 66.43 | 153.9 | 1.036 | 2.66 | 31.31 |
| 1093.6 | 68.86 | 156.3 | 1.036 | 2.70 | 41.34 |
| 931.5 | 65.59 | 163.5 | 1.036 | 2.82 | 33.66 |
| 828.9 | 64.04 | 148.6 | 1.036 | 2.57 | 32.96 |
| 926.5 | 67.19 | 152.8 | 1.036 | 2.64 | 35.83 |
| 1042 | 63.36 | 146.8 | 1.036 | 2.54 | 41.94 |
| 1260.4 | 59.37 | 137.1 | 1.036 | 2.37 | 54.32 |
| 1127.3 | 57.87 | 134 | 1.036 | 2.31 | 49.71 |
| 1170.9 | 58.96 | 136.4 | 1.036 | 2.36 | 50.72 |
| 902.4 | 64.55 | 146.9 | 1.036 | 2.54 | 36.30 |
| 795.9 | 61.34 | 141.5 | 1.036 | 2.44 | 33.23 |

采用相同的方法取**SRM**原始数据计算原地出发的每**0.1-0.5**秒脚底阻力值变化



将所有因素全部考虑到的数据。
可以看到比赛中不同阶段的情况变化。

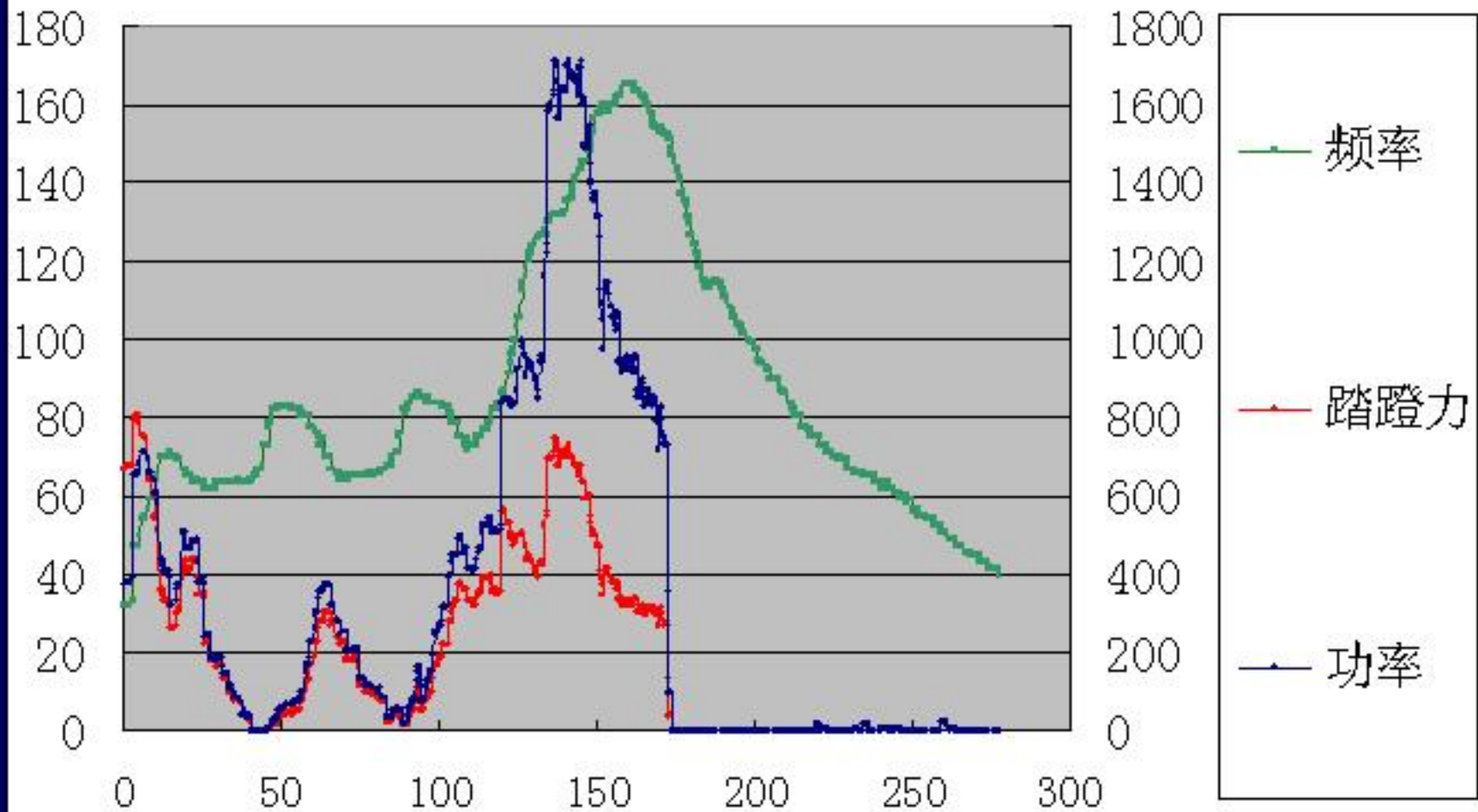
(叁) 对不同单车比赛项目力量特征的讨论

(1) 争先赛的踏蹬力特征 (录象)

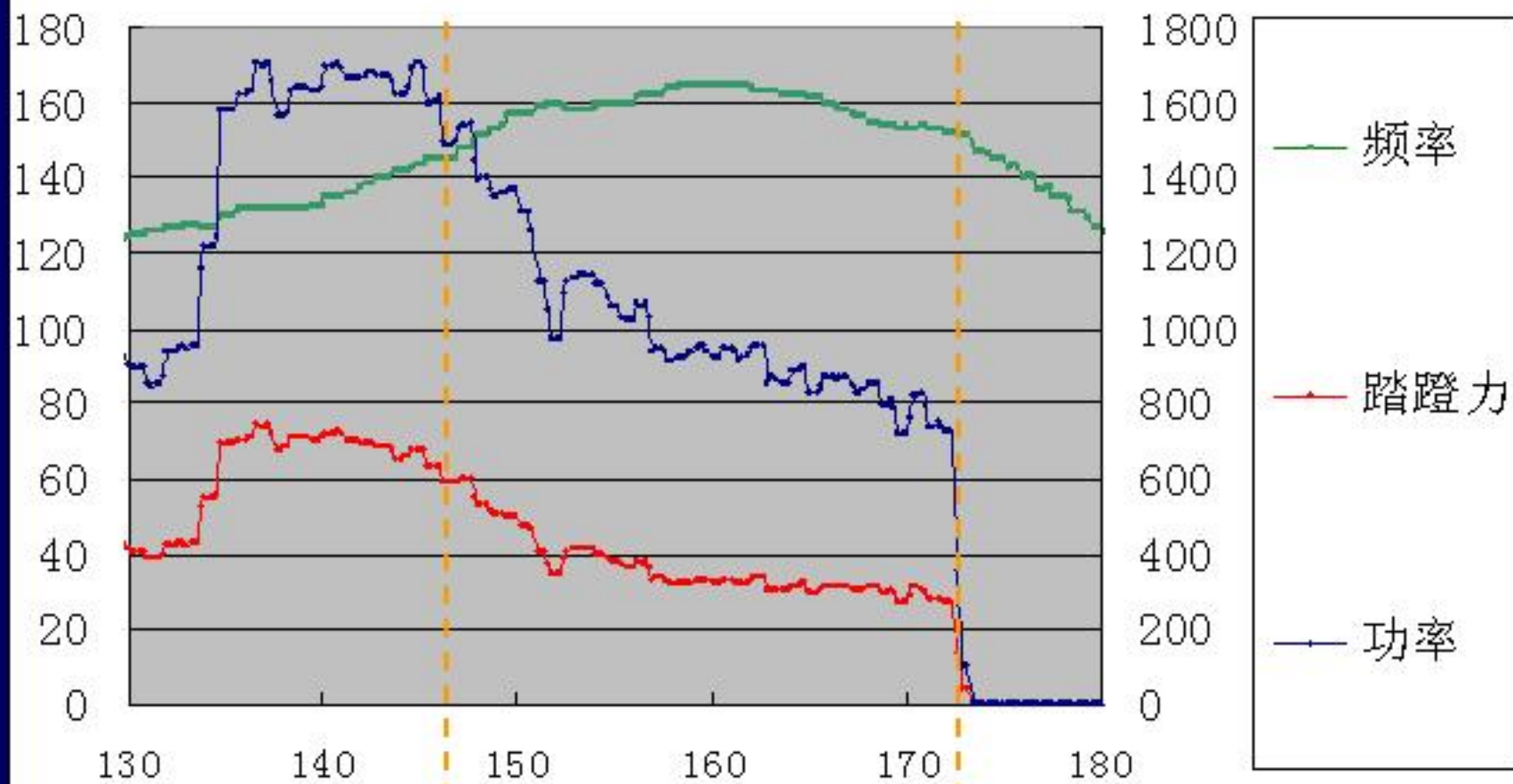


争先赛的踏蹬力特征 (录象)

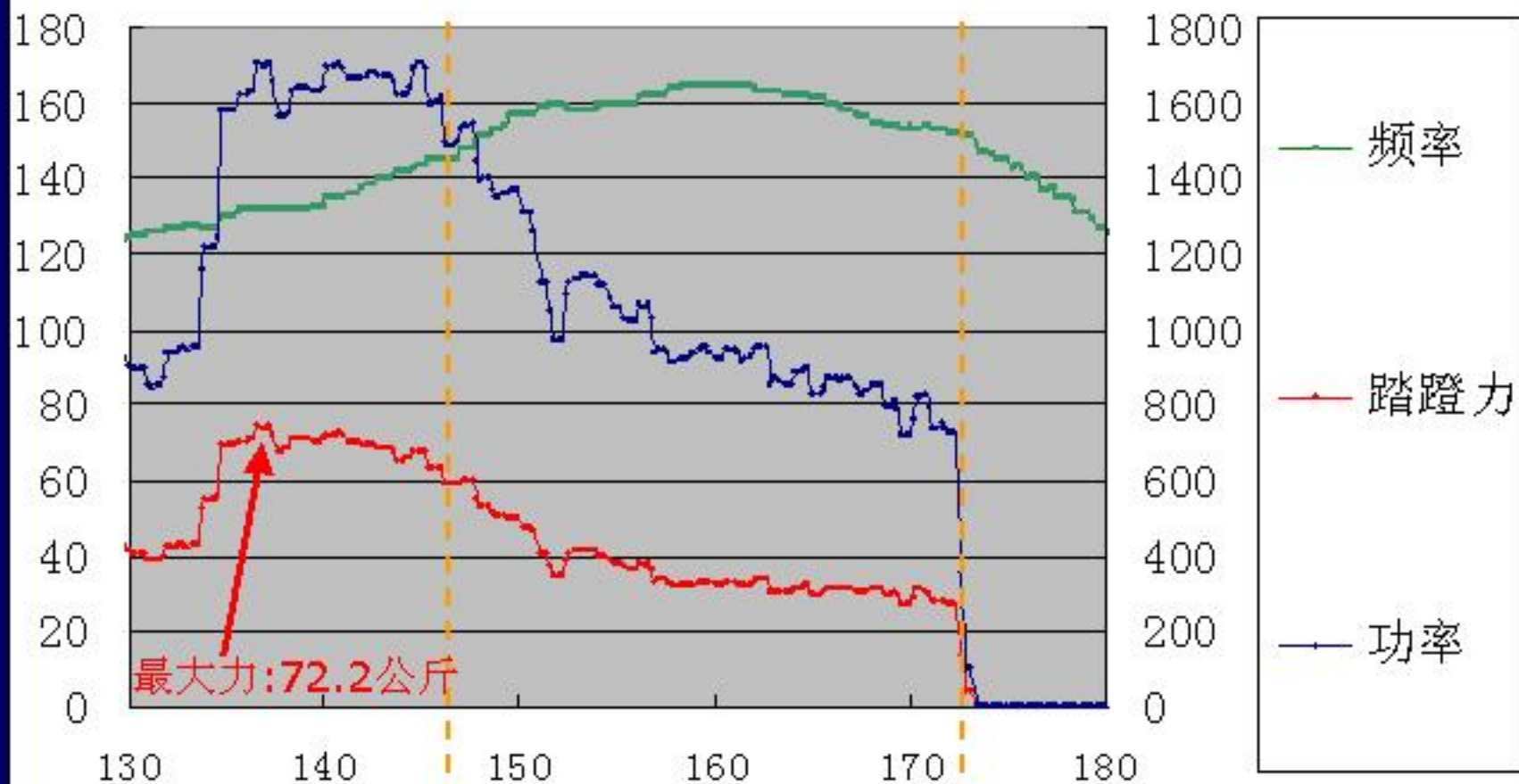




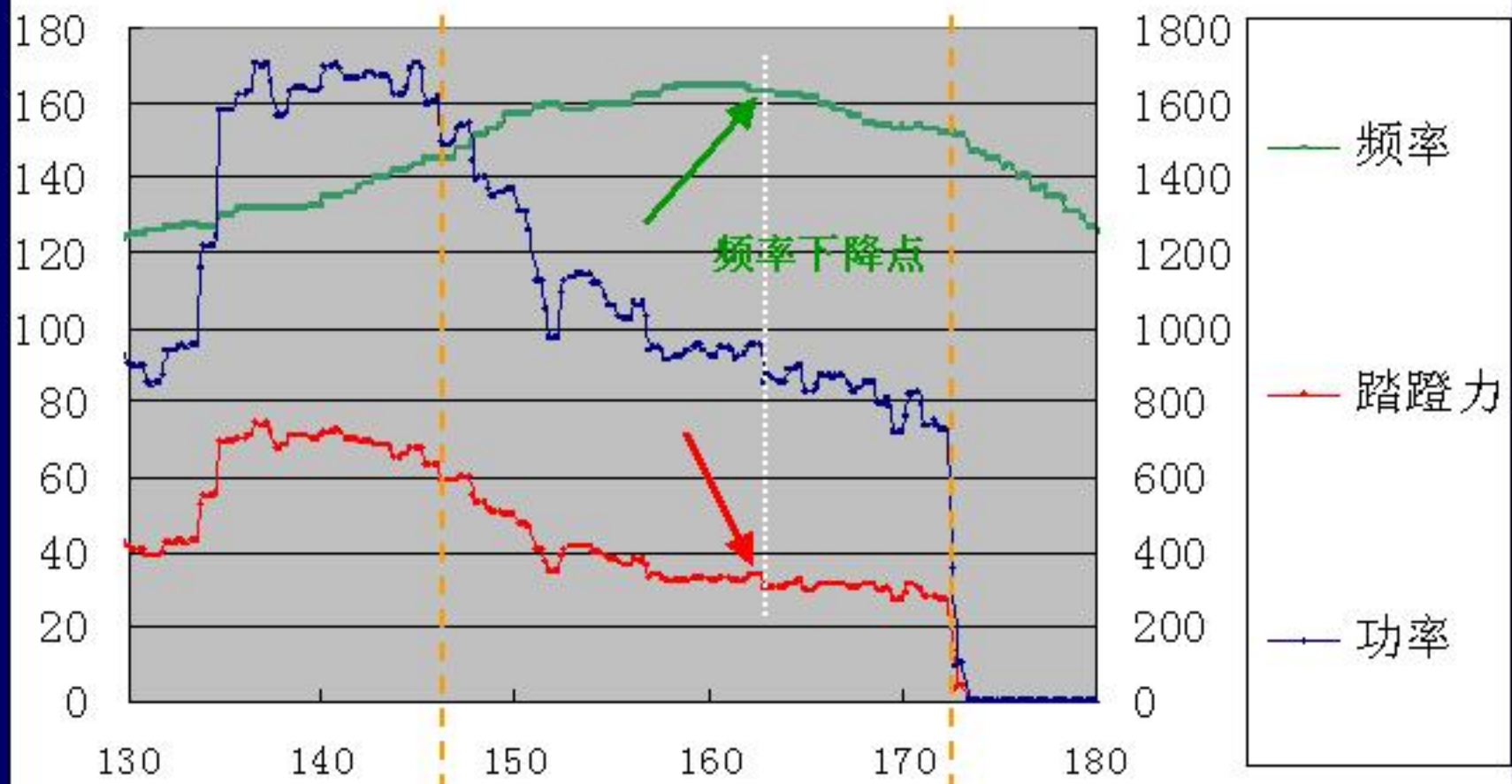
全部3圈的数据



200米比赛段



200米比赛段



200米比赛段

200米专项能力下降率

| | | |
|------|-------------|-------|
| 频率下降 | 165→151次/分 | 8.5% |
| 力量下降 | 32.2→27.3公斤 | 15.2% |
| 功率下降 | 926→723瓦 | 21.9% |

200米争先赛的专项力量特征

全程最大力 72.2公斤（用于加速）

全程最大频率 165次/分

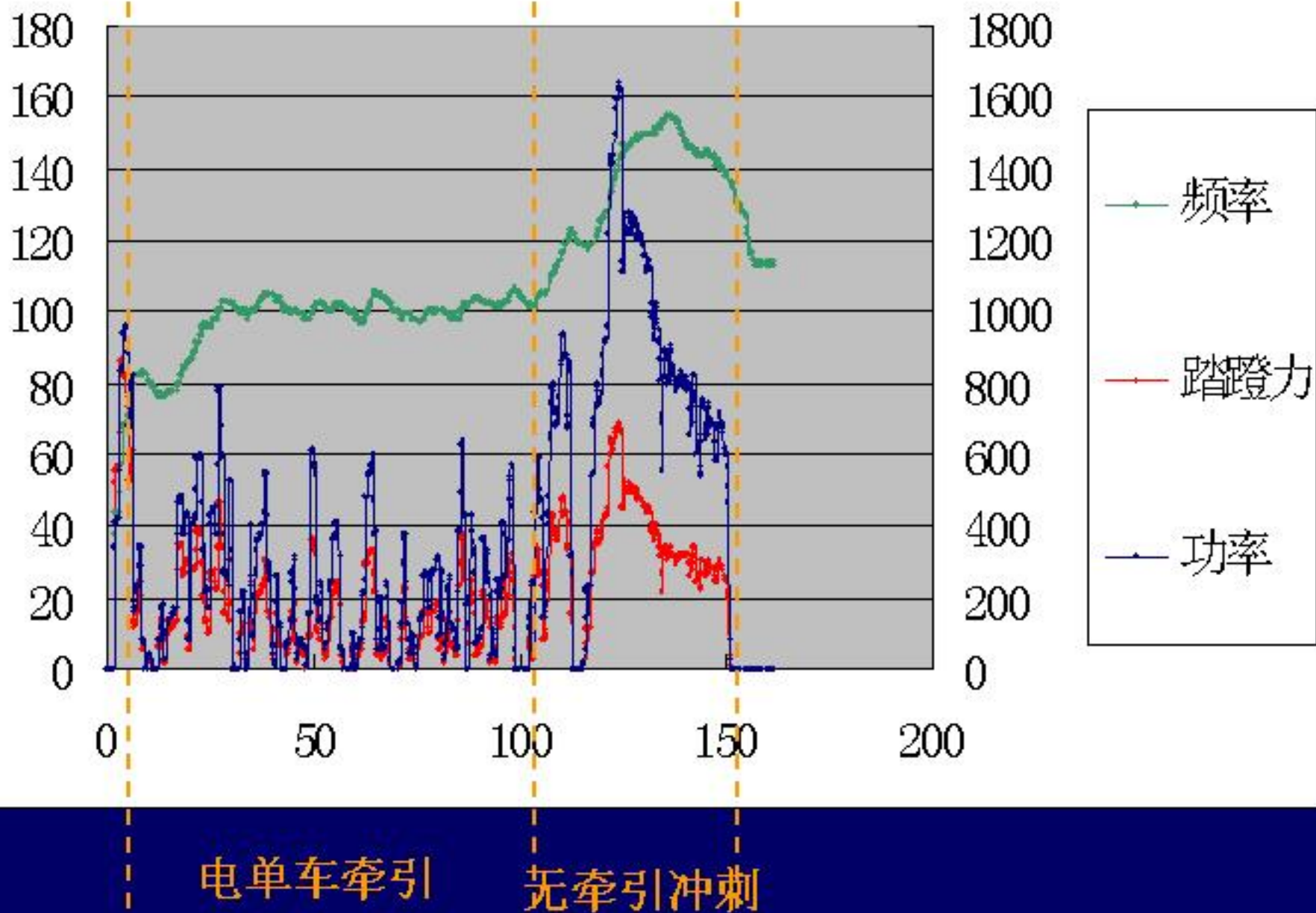
维持最大频率所需力量 32.2公斤(用于不减速)

*72.2公斤的最大力量和165次/分背景

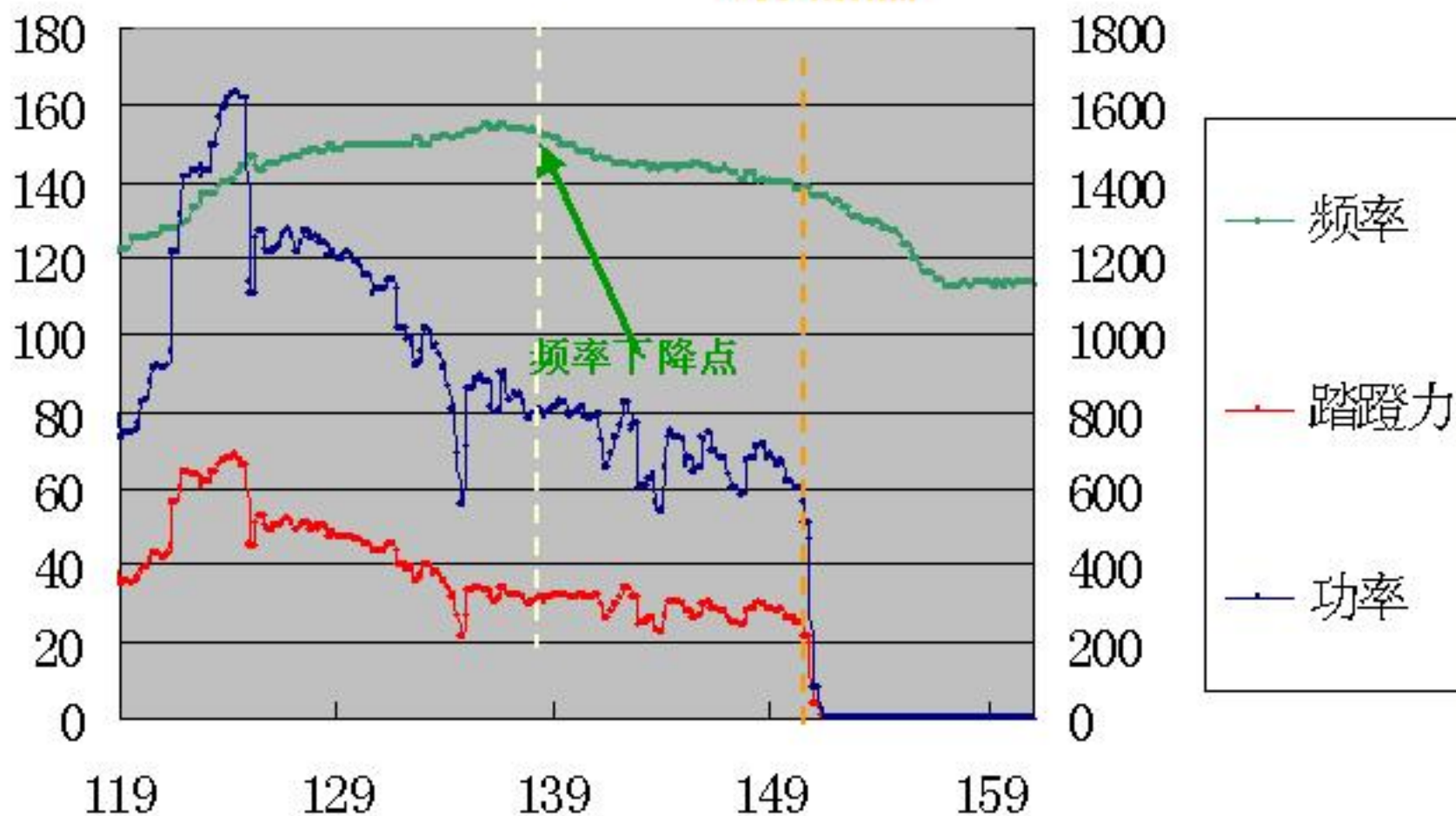
下的32.2公斤踏蹬力量是200米专项力量。

(2) 凯林赛的踏蹬力特征 (录像)





比赛结束点



无牵引段 频率下降前：良性加速段。
频率下降后：能力下降段。

凯林赛专项能力下降率(从频率最高点计)

频率下降 156 → 139次/分 10.9%

力量下降 30.6 → 25.5公斤 16.7%

功率下降 797 → 596瓦 25.2%

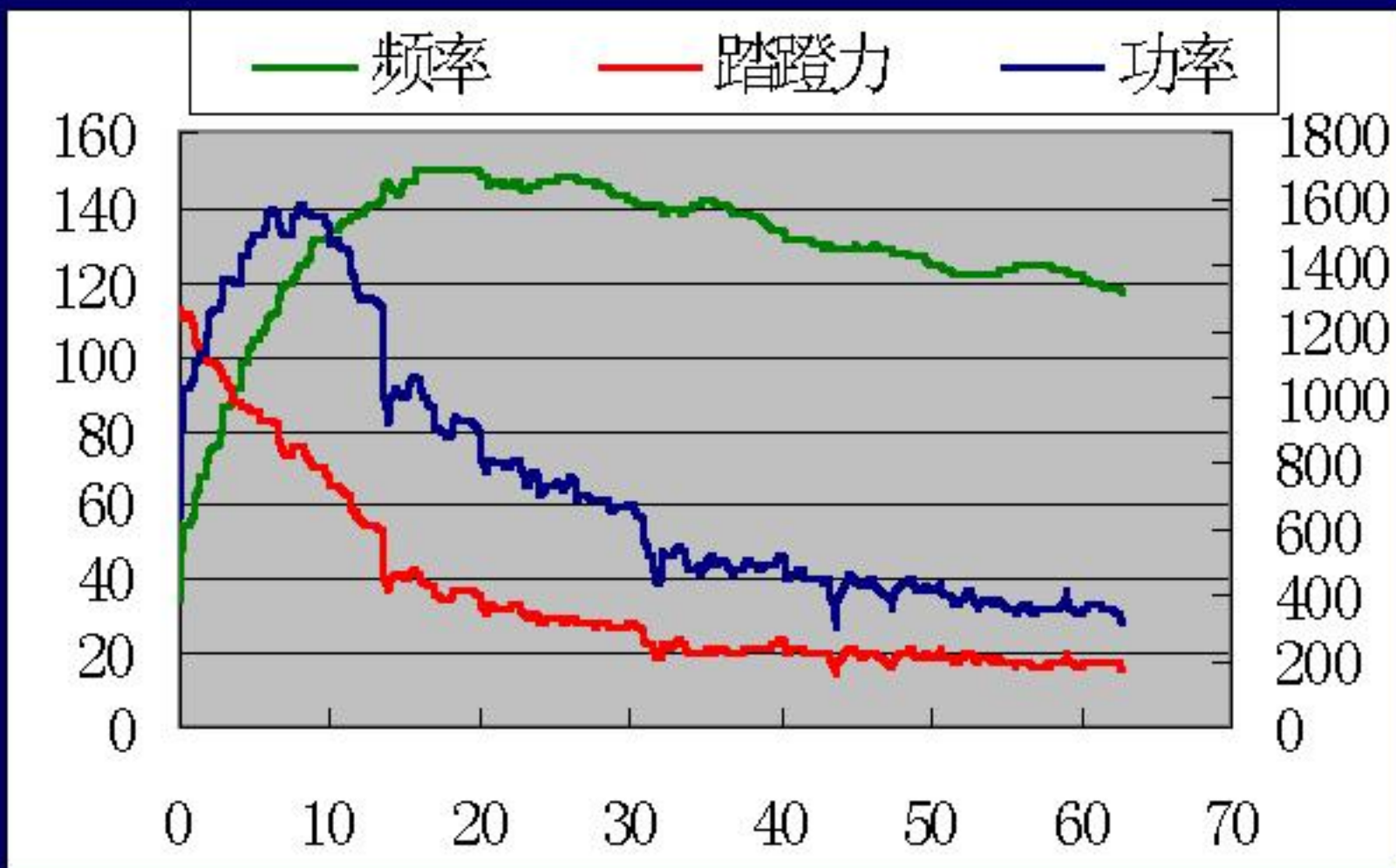
凯林赛的力量特征

| | |
|------------|---------------|
| 全程最大力 | 68.8公斤（用于加速） |
| 全程最大频率 | 156次/分 |
| 维持最大频率所需力量 | 30.6公斤（用于不减速） |

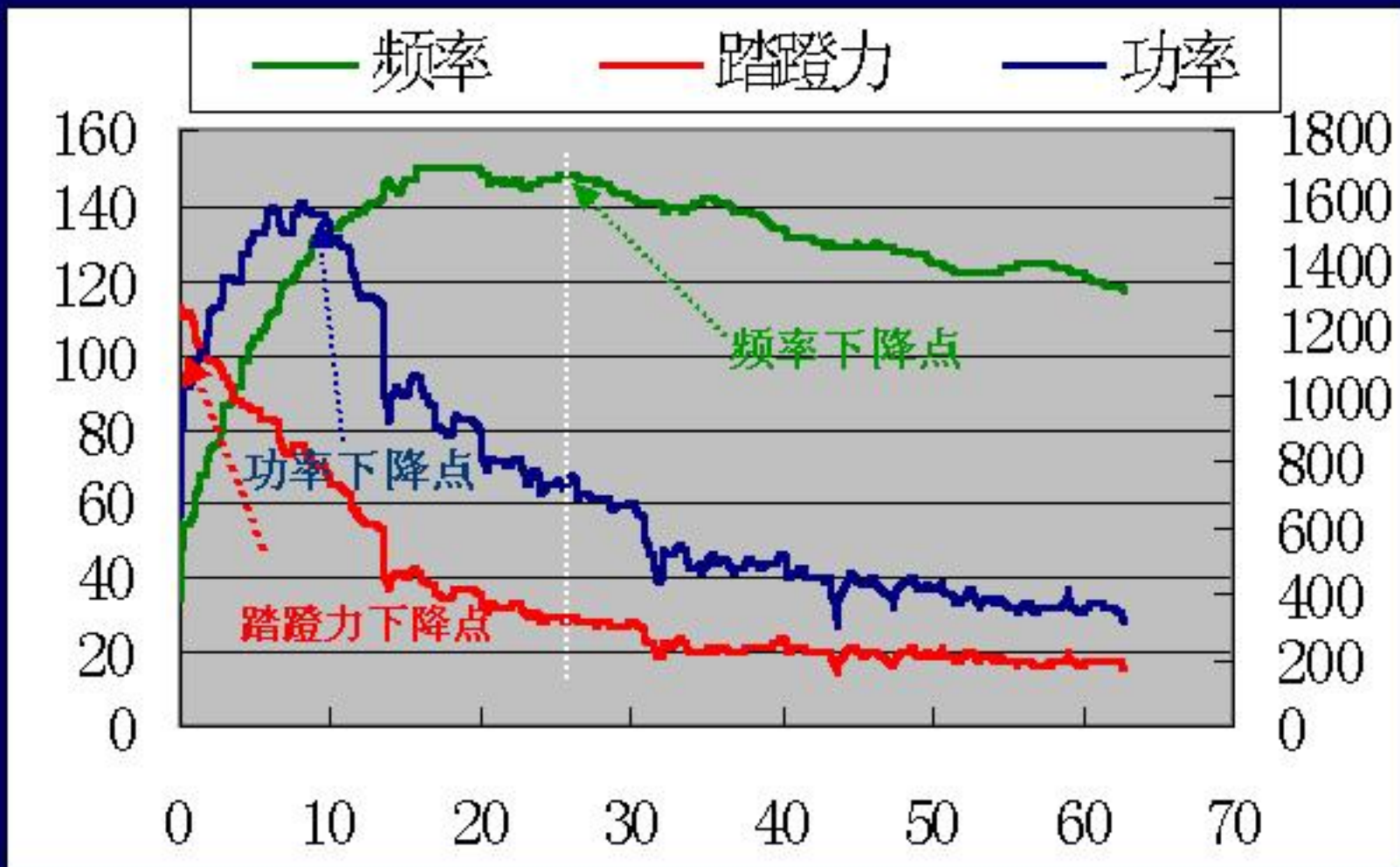
*68.8公斤的最大力量和**在156次/分背景下的30.6公斤踏蹬力量**是凯林专项力量。

(3) 1km 计时赛的踏蹬力特征 (录象)





1公里全程功率，频率，踏蹬力曲线



图中有**3**个下降点值得关注。

在**1**公里比赛的全程中有**3**个指标的下降点存在。

1.踏蹬力的下降:

踏蹬力从一开始（**112**公斤）就下降，但是速度是增加的，所以踏蹬力仍然大于人车系统阻力。这是单车运动的特点，不是运动员能力的下降。

2.功率的下降:

1公里原地出发后8.2秒，速度达到49.2km/h，频率124/min时功率开始下降，但是功率的下降是因为踏蹬力的下降，此时速度频率还在上升，在频率达到最高点前这段过程功率的下降和踏蹬力的下降是单车运动的必然现象，不可避免。

3.频率的下降:

关键问题在于频率和踏蹬力的同步下降点的出现,这个点(**28.2**秒时刻, 频率**146**, 踏蹬力**28.2kg**)的出现和以后的下降率是运动员个体专项能力下降的标志。因此, 保持**146**频率背景下的**28.2**公斤踏蹬力是**1**公里的专项力量。

各个指标的下降率（从频率最高点开始）

| | | |
|-----|-------------|-------|
| 功率 | 681---316 | 54.0% |
| 频率 | 146---117 | 19.9% |
| 踏蹬力 | 28.2---16.0 | 43.3% |

踏蹬力在各个时段的百分比

| | | |
|-----------|-------|-------|
| 大于100公斤 | 1.8秒 | 2.7% |
| 100-80公斤 | 4.4秒 | 6.8% |
| 80-60公斤 | 5.2秒 | 8.0% |
| 60-28.2公斤 | 16.8秒 | 25.8% |
| 需要维持专项力量 | 36.8秒 | 56.6% |

***28.2秒**之前是加速段，踏蹬力已经大于系统阻力，而且时间比例较小，再通过踏蹬力的增加来提高速度的潜力不大。

***28.2秒**之后是减速段，踏蹬力已经小于系统阻力，而且时间比例最大，所以通过提高这段时间的专项踏蹬力来提高速度的潜力最大。

(4) 竞速赛的踏蹬力特征 (录象)

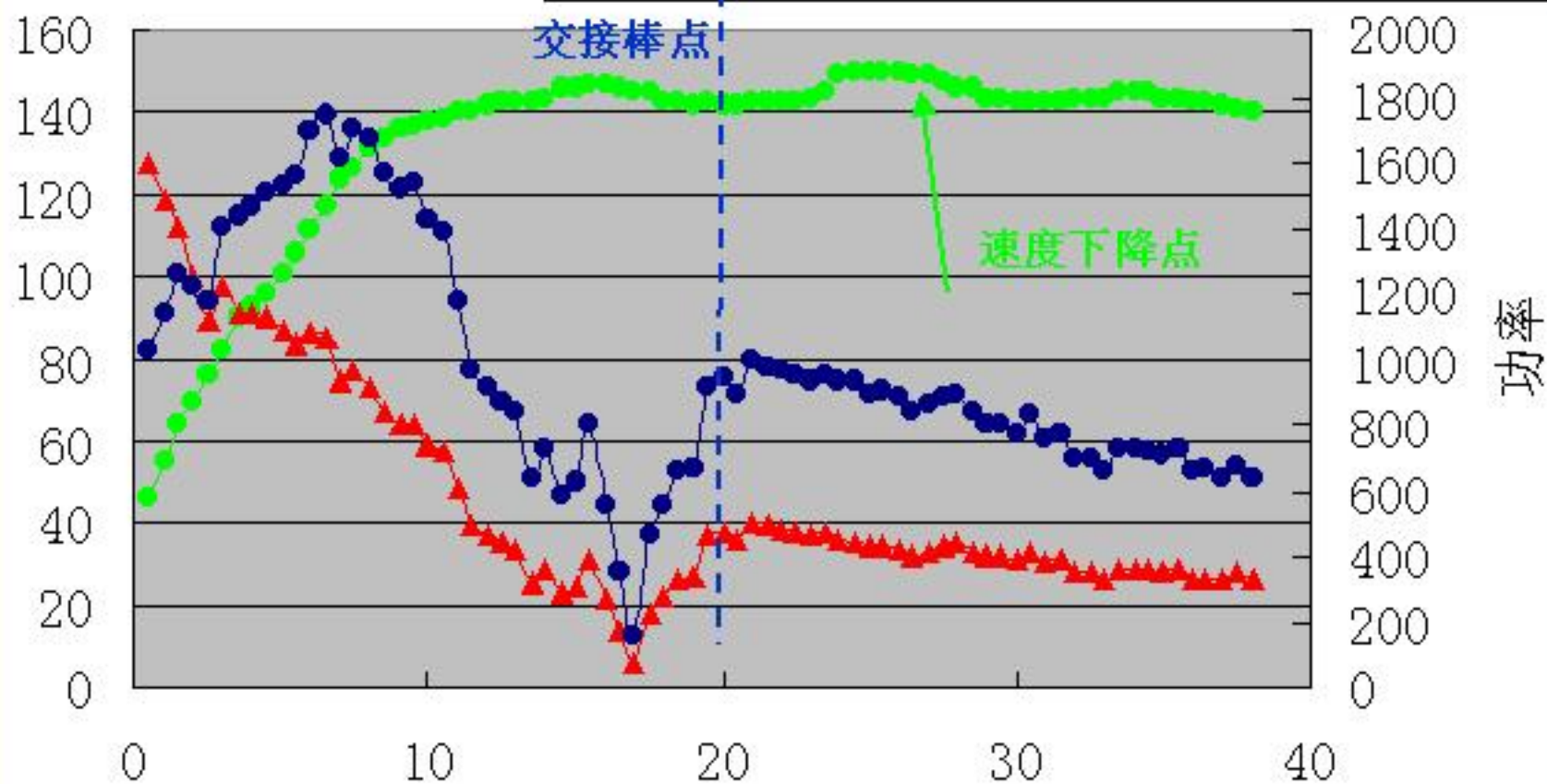


竞速第2棒

● 频率

▲ 踏蹬力

● 功率

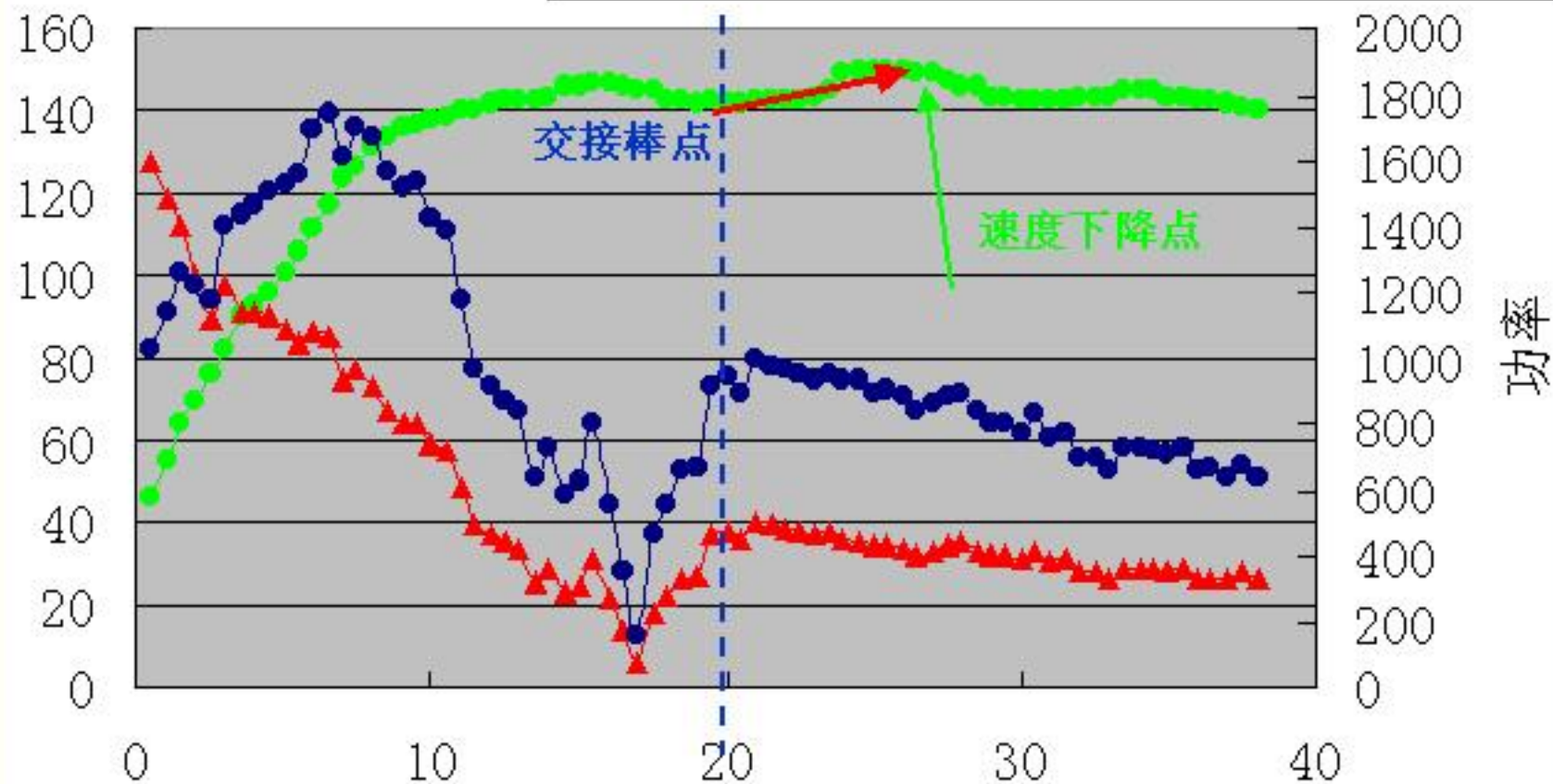


竞速第2棒

● 频率

▲ 踏蹬力

● 功率



交接棒后

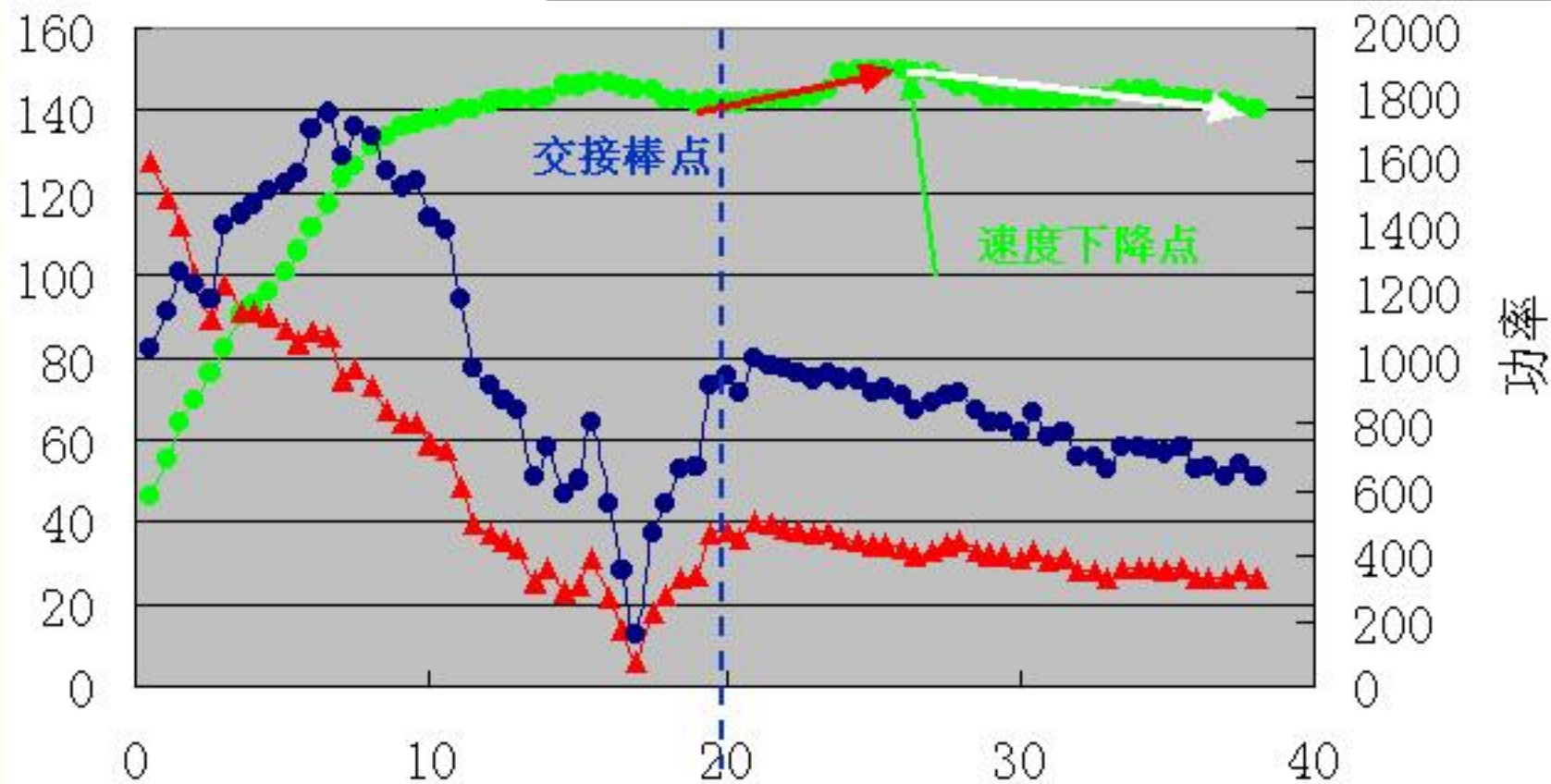
| | | |
|-----------|------|-------------|
| 频率变化 | 时间 | 踏蹬力变化 |
| 142---149 | 7.5秒 | 27.1---33.0 |

竞速第2棒

● 频率

▲ 踏蹬力

● 功率



频率变化

时间

踏蹬力变化

交接棒后

142---149

7.5秒

27.1---33.0

速度下降后

149---140

11.0秒

33.0---25.9

第**2**棒运动员经历了一个加速段和一个减速段

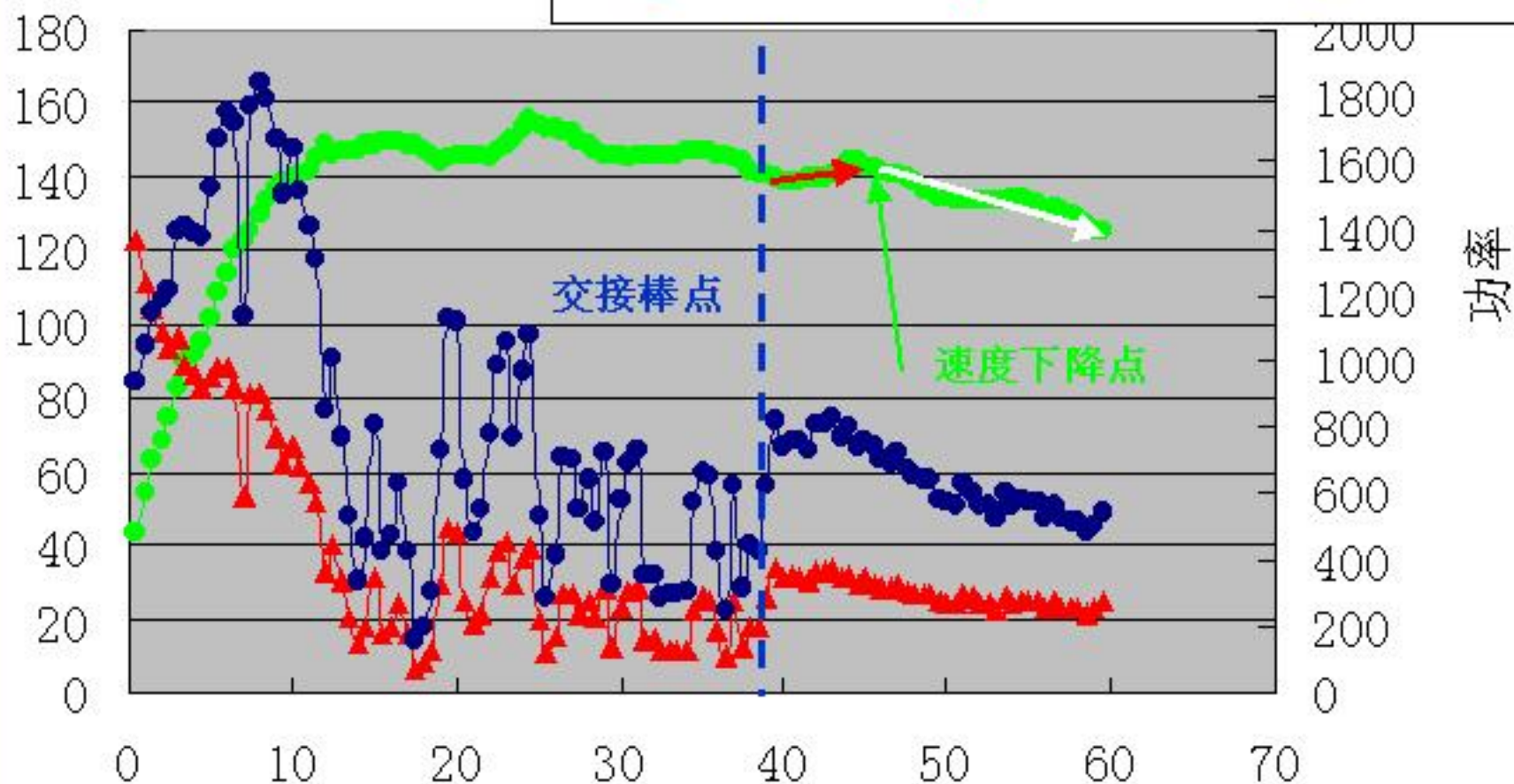
减速段的速度下降幅度和持续时间都比加速段要大，这就是训练中首要解决的问题。如何让减速段的时间少点，速度下降幅度小点，关键在于减速段的踏蹬力维持能力。也就是对频率**149**次/分背景下的**33.0**公斤踏蹬力的保持能力。这就是第**2**棒运动员的专项力量。

竞速第3棒

● 频率

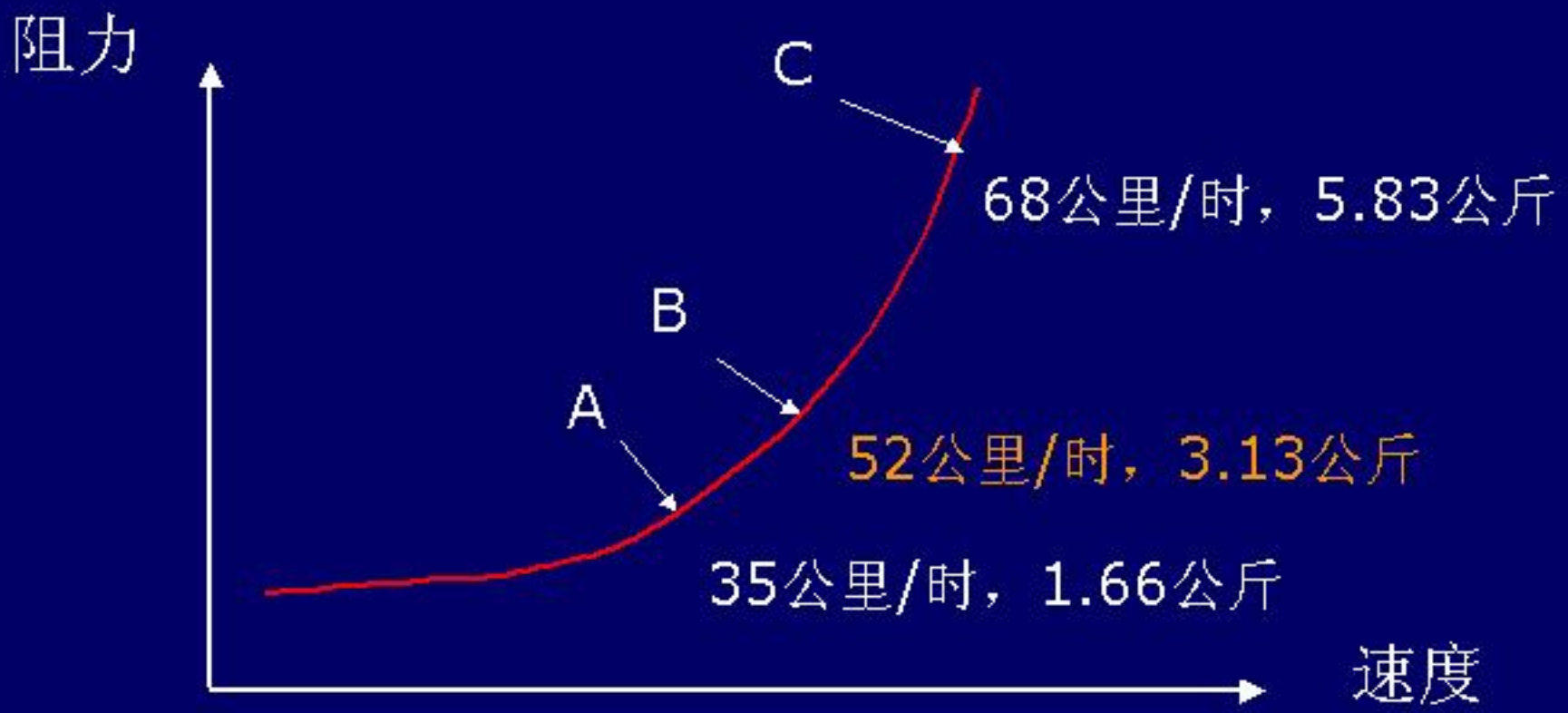
▲ 踏蹬力

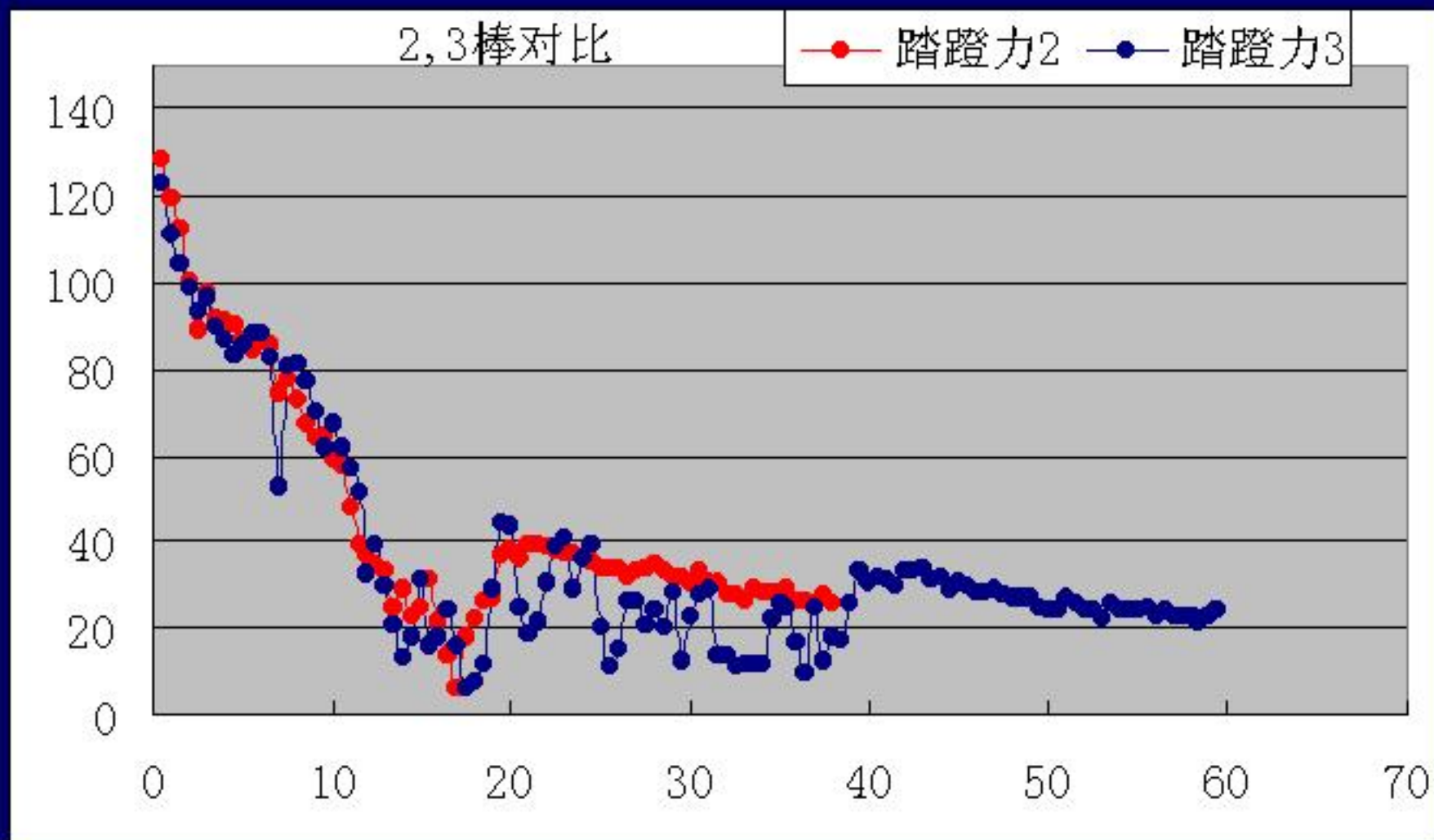
● 功率



| | 频率变化 | 时间 | 踏蹬力变化 |
|-------|------------------|--------------|--------------------|
| 交接棒后 | 142---144 | 6.5秒 | 17.4---31.1 |
| 速度下降后 | 144---126 | 15.0秒 | 31.1---24.6 |

在匀速情况下人/单车系统的阻力/速度关系

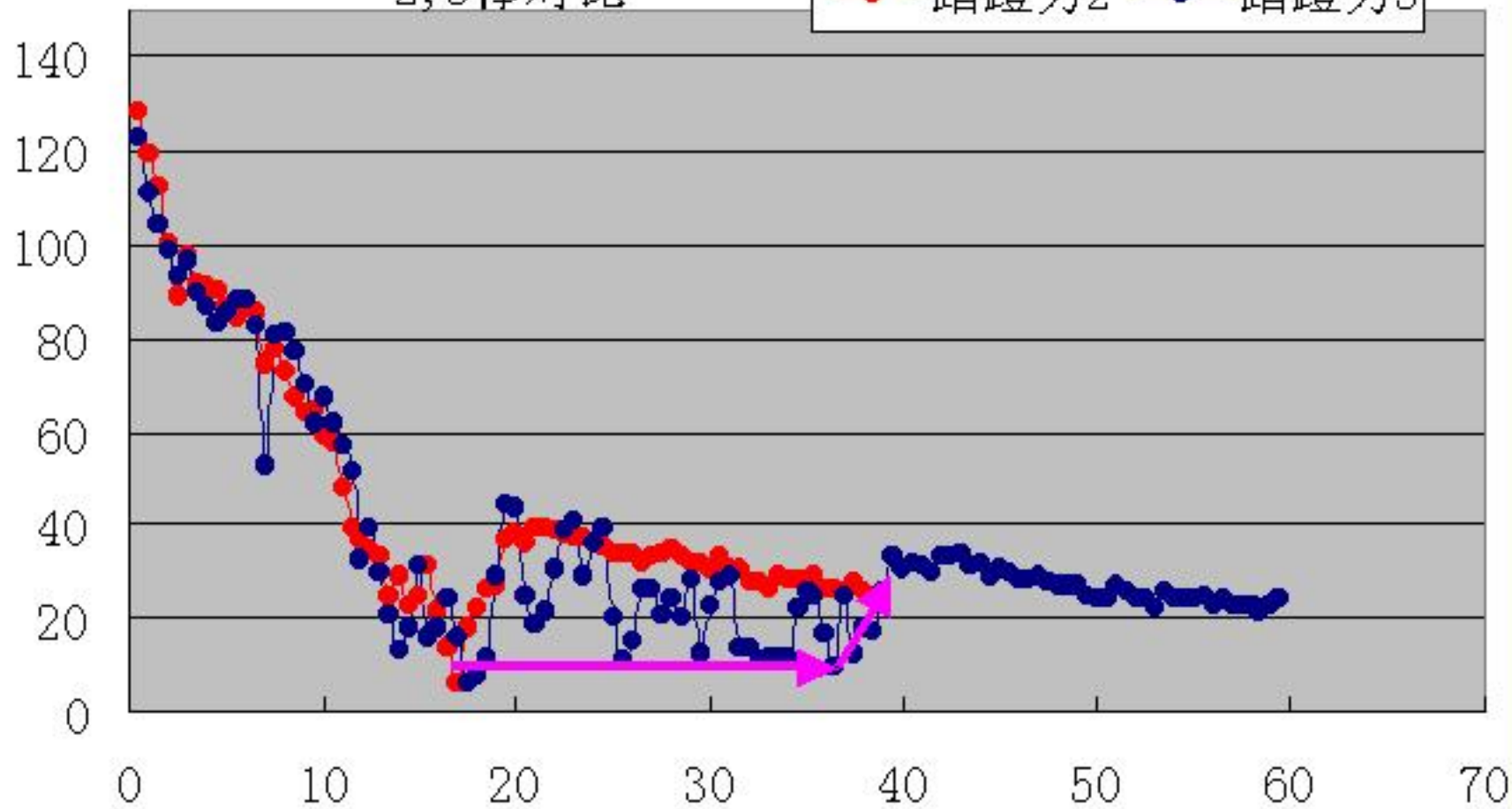




第**3**棒运动员在第**2**棒运动员领骑时，所做的尾随技术不好，其踏蹬力显示出飘忽不定的形态。

2,3棒对比

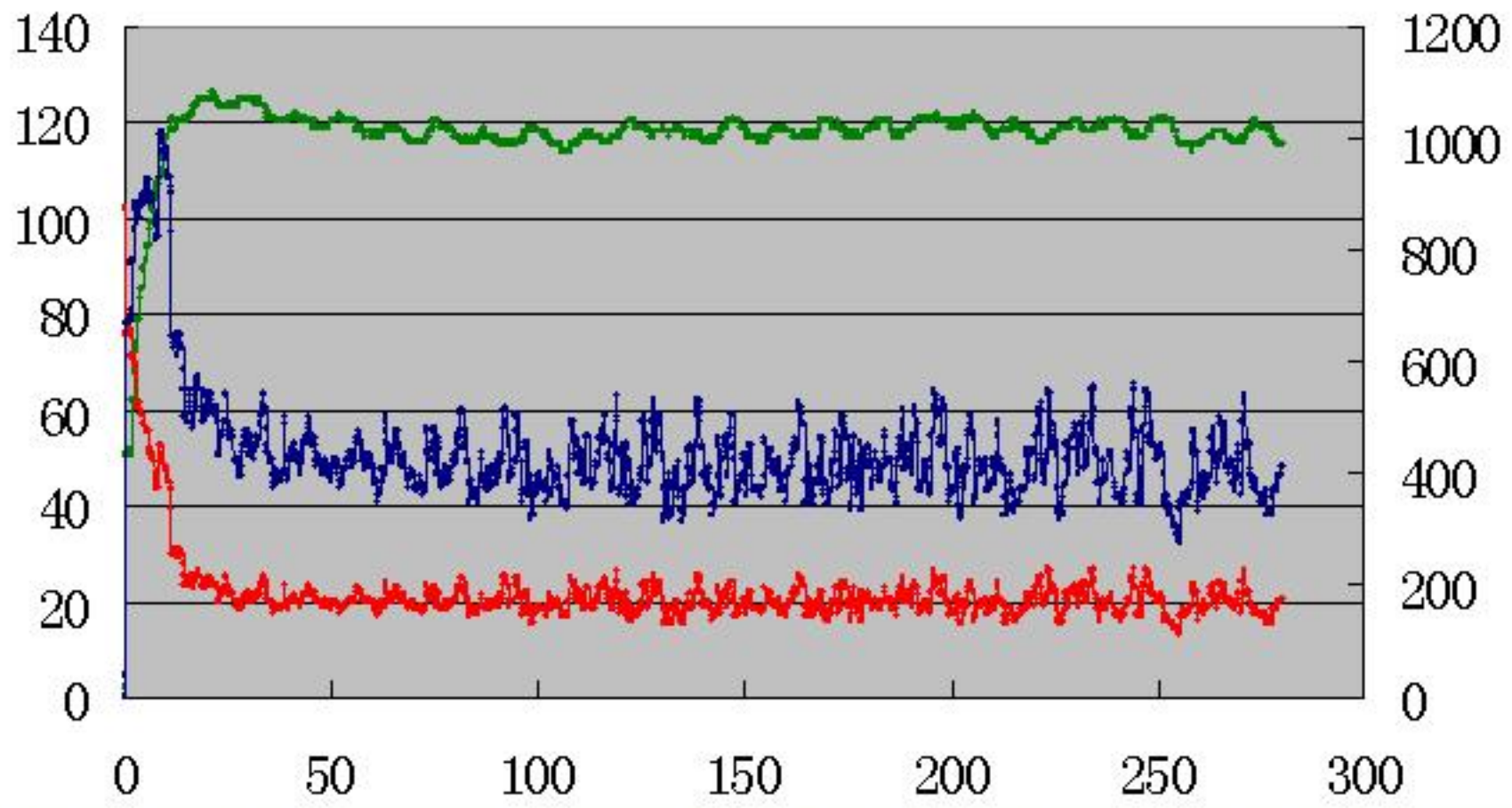
—●— 踏蹬力2 —●— 踏蹬力3



如果象粉红箭头所示那样就完美了。

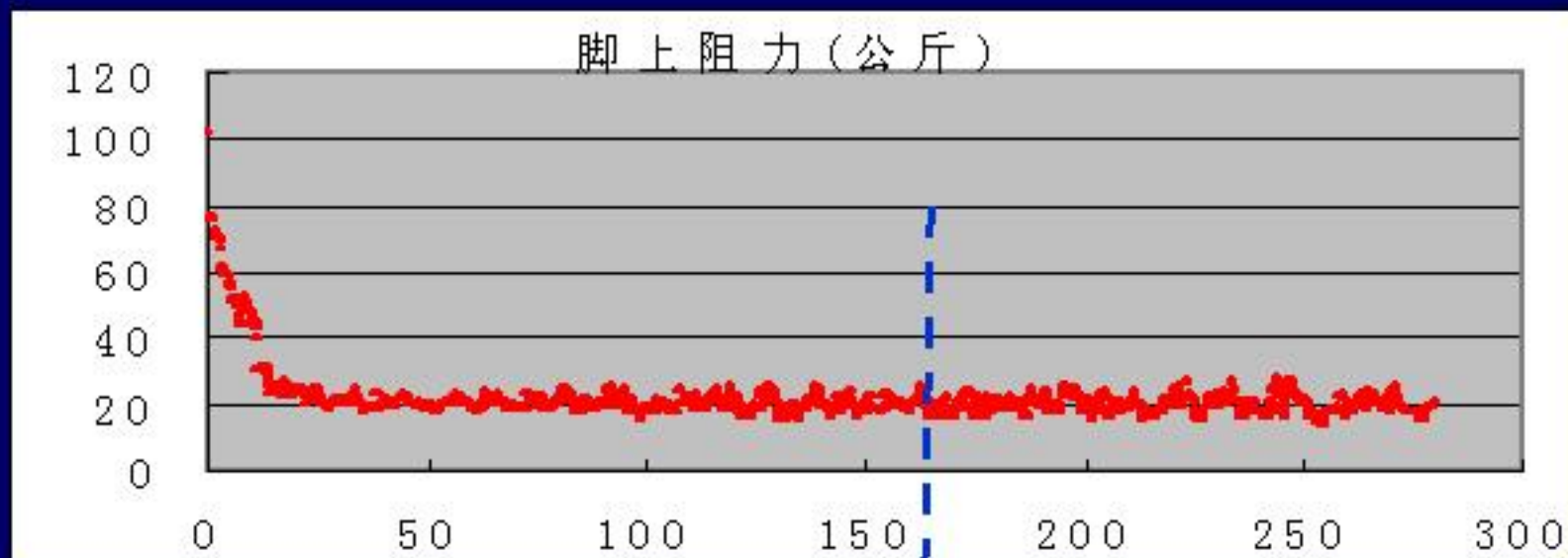
(5) 4公里个人计时赛的踏蹬力特征

— 频率 — 脚上阻力(公斤) — 功率

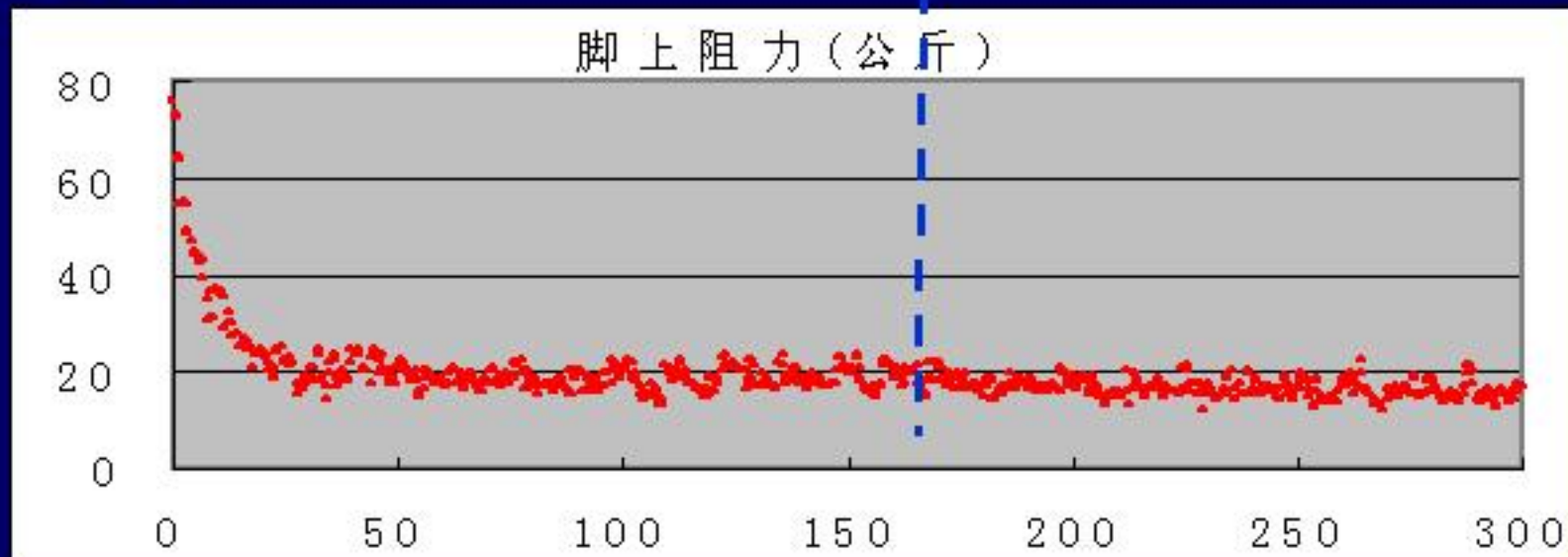


最大力为**100**公斤，加速段**10**秒。之后进入匀速段，维持速度的踏蹬力在**20**公斤左右。

4'40"



5'05"



成绩

后半程数据

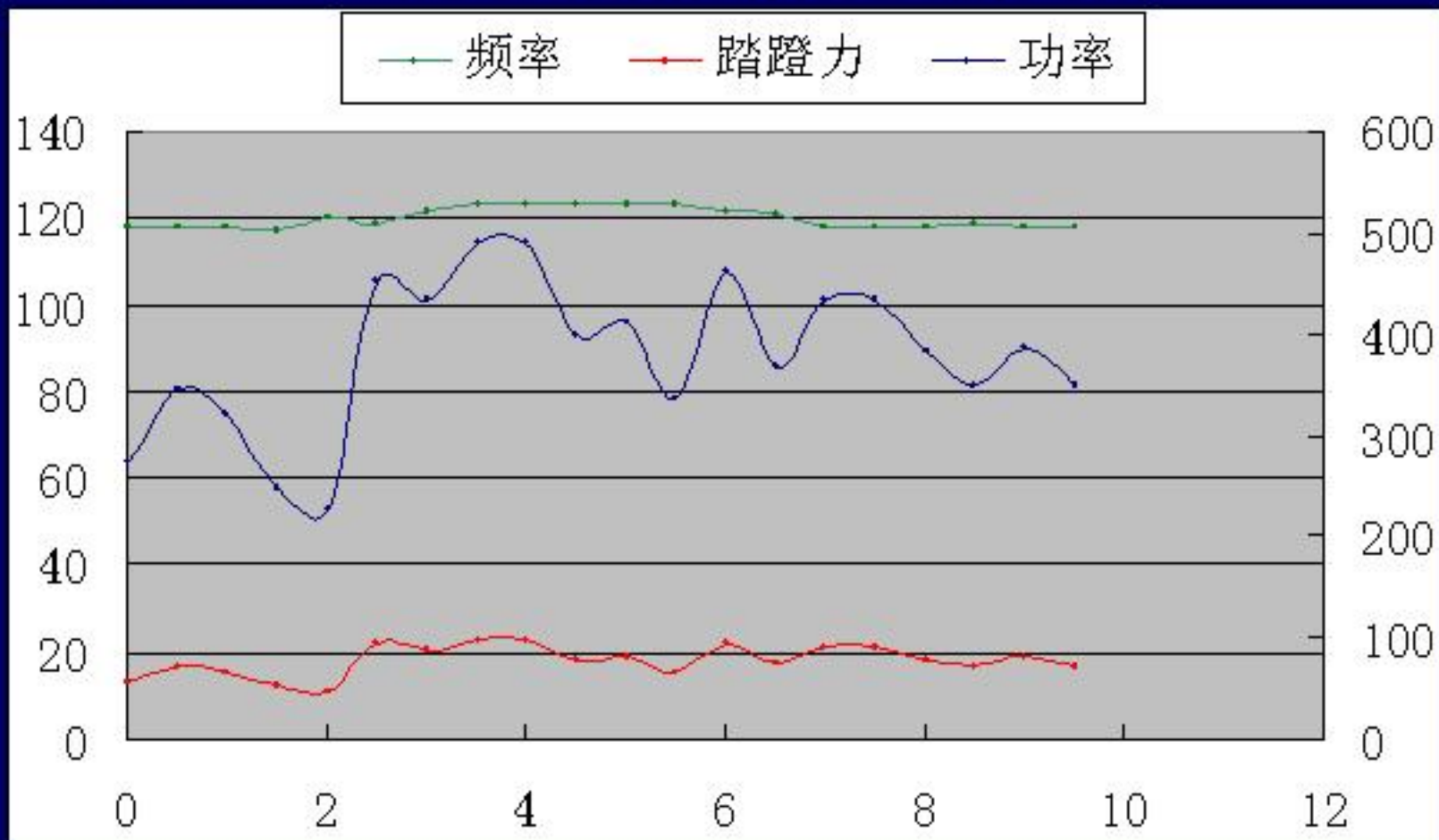
| | 功率 (W) | 频率 (/min) | 踏蹬力 (kg) |
|-------|--------|-----------|----------|
| 4'40" | 412.5 | 118.3 | 19.7 |
| 5'05" | 324.8 | 110.0 | 16.7 |

在**118次/分**频率背景下维持**19.7公斤**的踏蹬力是4公里个人追逐赛的专项力量。

(6) 记分赛的踏蹬力特征 (录象)



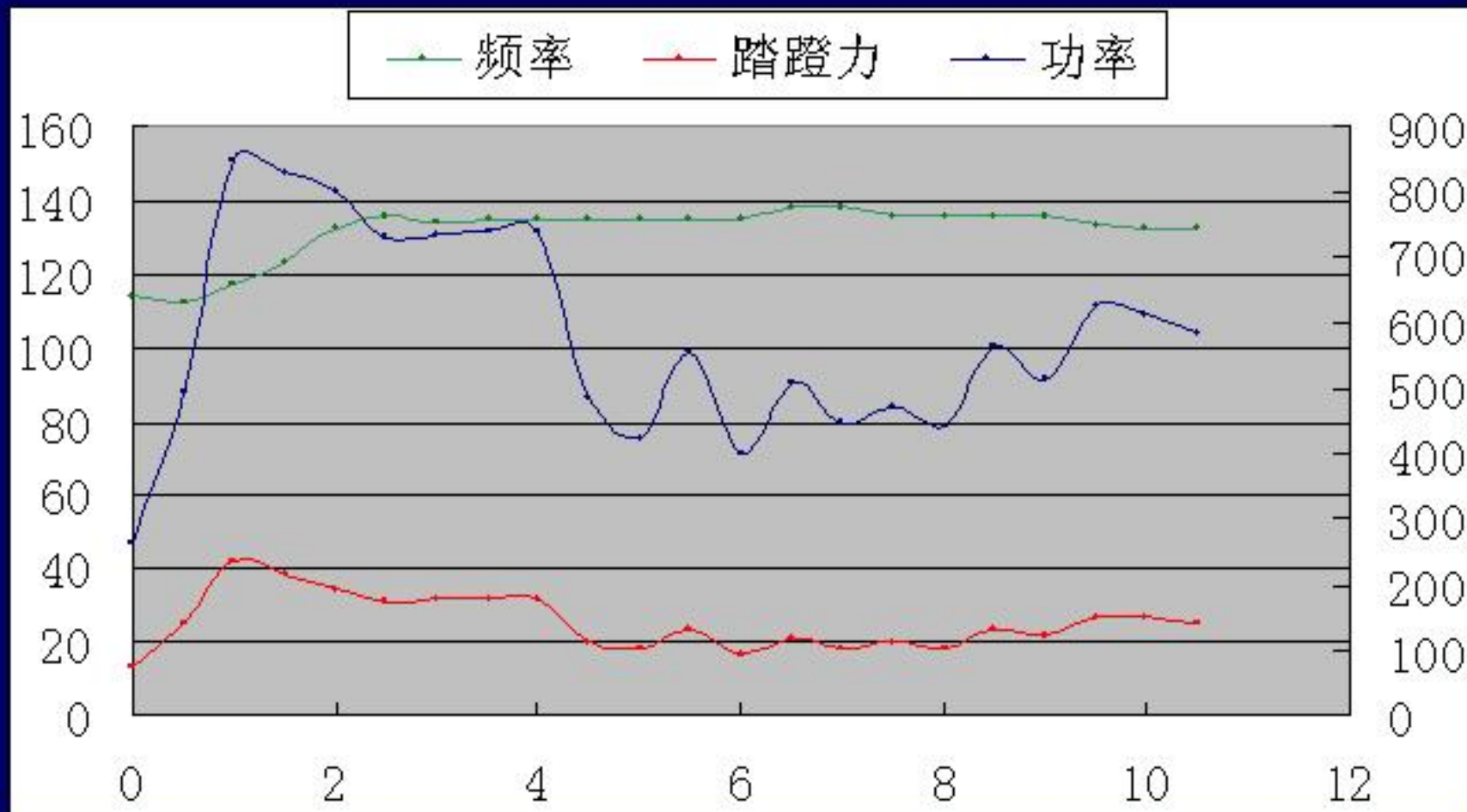
记分赛一般骑行尾随的踏蹬力



记分赛**6**次一般骑行尾随的踏蹬力

| 次数 | 功率 | 速度 | 频率 | 踏蹬力 |
|-----|-------|------|-------|------|
| 1 | 291.4 | 53.9 | 123.7 | 13.5 |
| 2 | 301.1 | 49.1 | 113.3 | 15.2 |
| 3 | 290.9 | 51.0 | 117.6 | 14.2 |
| 4 | 296.4 | 53.1 | 122.0 | 13.9 |
| 5 | 274.0 | 51.2 | 117.5 | 13.8 |
| 6 | 262.5 | 51.3 | 118.3 | 12.7 |
| 平均值 | | | 118.7 | 13.8 |

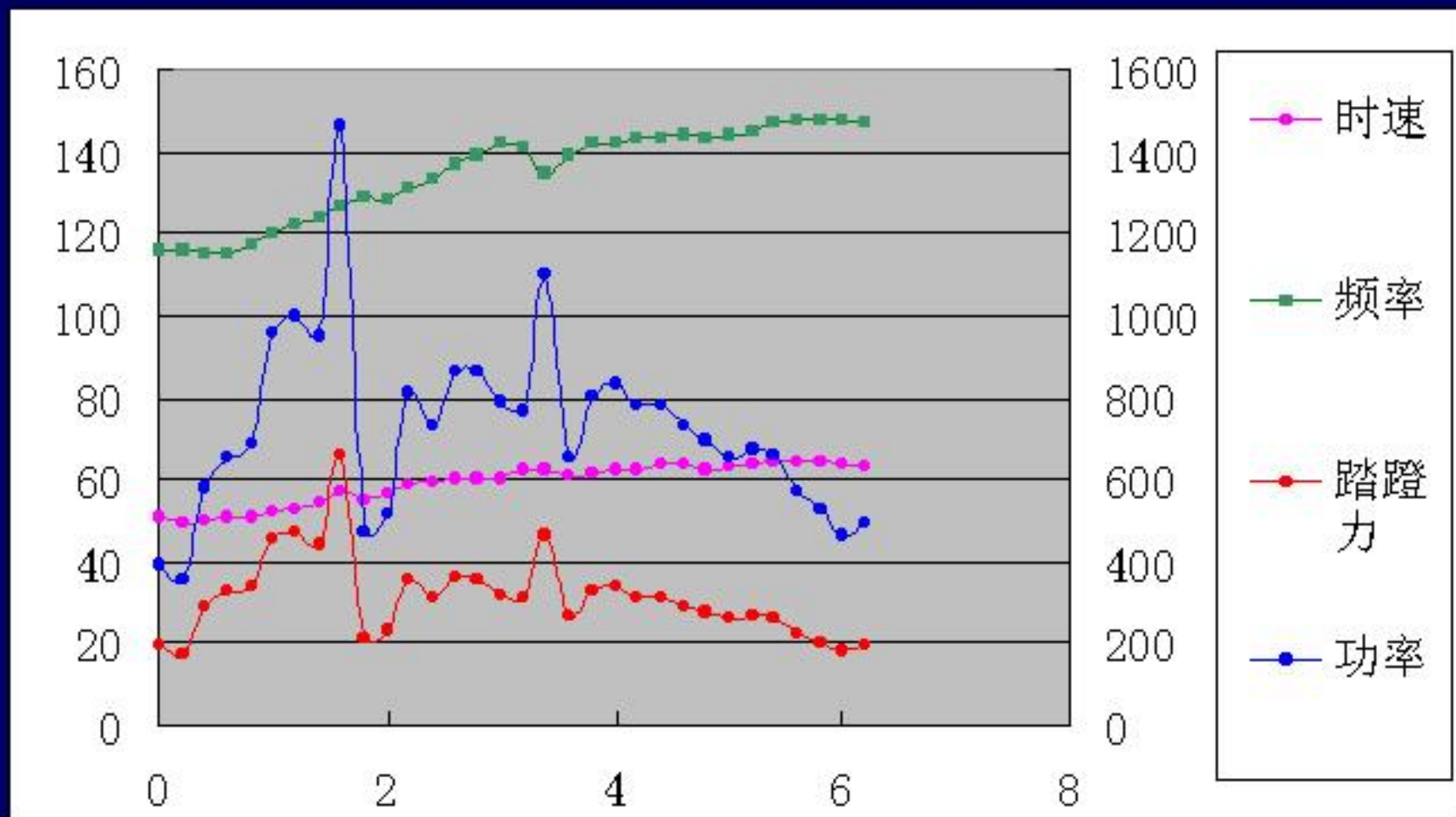
记分赛一般骑行领骑的踏蹬力



记分赛**6**次一般骑行领骑的踏蹬力

| 次数 | 功率 | 速度 | 频率 | 踏蹬力 |
|-----|-------|------|-------|------|
| 1 | 372.8 | 52.5 | 121.1 | 17.7 |
| 2 | 458.4 | 53.4 | 126.1 | 20.8 |
| 3 | 336.5 | 52.2 | 120.1 | 16.1 |
| 4 | 408.4 | 49.9 | 113.4 | 20.7 |
| 5 | 445.8 | 60.9 | 140.1 | 18.2 |
| 6 | 299.4 | 45.9 | 105.4 | 16.3 |
| 平均值 | | | 121.0 | 18.3 |

记分赛抢分圈的踏蹬力



最大力为**66.2**公斤，平均值为**31.2**公斤

在这次抢分圈行为中：

*最大踏蹬力（66.2公斤），和短距离200米争先赛的最大踏蹬力量（80公斤）要求十分接近。

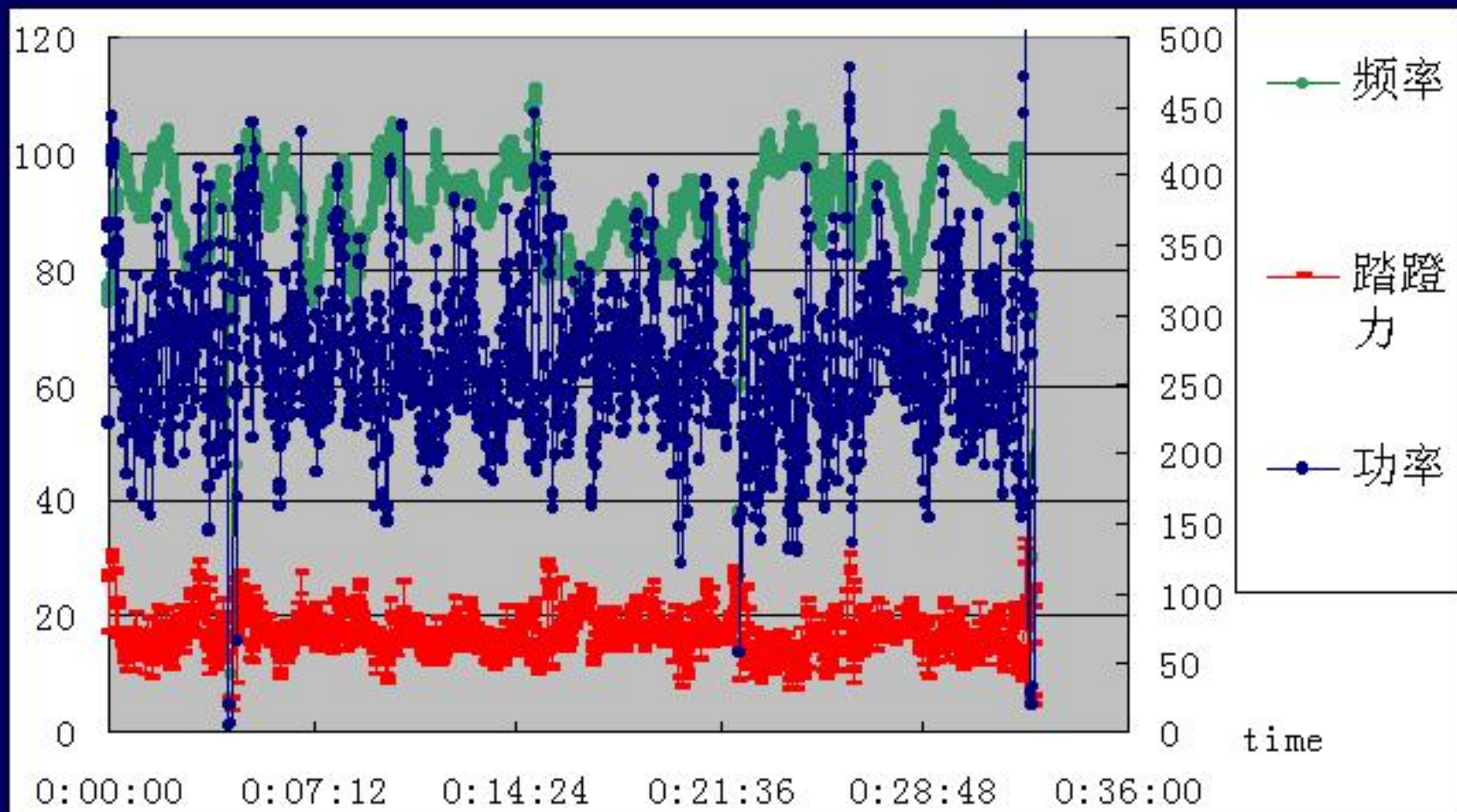
*平均踏蹬力（31.2公斤）和短距离200米争先赛的维持频率所需踏蹬力量（32.2公斤）要求也十分接近。

怎么可以说中长距离的记分赛是耐力性项目？

记分赛**6**次抢分圈的踏蹬力

| 次数 | 功率 | 速度 | 频率 | 踏蹬力 | 表现 |
|-----|-------|------|-------|------|----|
| 1 | 727 | 58.9 | 136.3 | 31.2 | 第1 |
| 2 | 498.8 | 54.4 | 125.6 | 22.8 | 第5 |
| 3 | 579.6 | 59.0 | 135.2 | 24.6 | 第3 |
| 4 | 608.6 | 57.6 | 134.4 | 26.0 | 第2 |
| 5 | 674.1 | 58.8 | 134.5 | 28.7 | 第2 |
| 6 | 542.1 | 60.6 | 139.5 | 22.3 | 第6 |
| 平均值 | | | 133.2 | 26.5 | |

(7) 公路平路骑行的踏蹬力特征



南京25公里公路训练

公路平路**25**公里个人一般领骑的踏蹬力

| | 功率 | 速度 | 频率 | 踏蹬力 |
|-----|-----|------|-------|------|
| 平均值 | 266 | 45.8 | 90.3 | 16.9 |
| 最大值 | 504 | 58.3 | 111.0 | 33.2 |
| 最小值 | 5 | 35.3 | 6 | 3.4 |

总结：单车专项踏蹬力量特征

| | 频率 | 踏蹬力 |
|--------|-------|------|
| 争先赛 | 165 | 32.2 |
| 凯林赛 | 154 | 30.6 |
| 1公里计时 | 146 | 28.2 |
| 4公里追逐赛 | 118.3 | 19.7 |
| 记分赛尾随 | 118.7 | 13.8 |
| 记分赛领骑 | 121.0 | 18.3 |
| 记分赛抢分 | 133.2 | 26.5 |
| 公路平路训练 | 90.3 | 16.9 |

（肆）理论上的总结

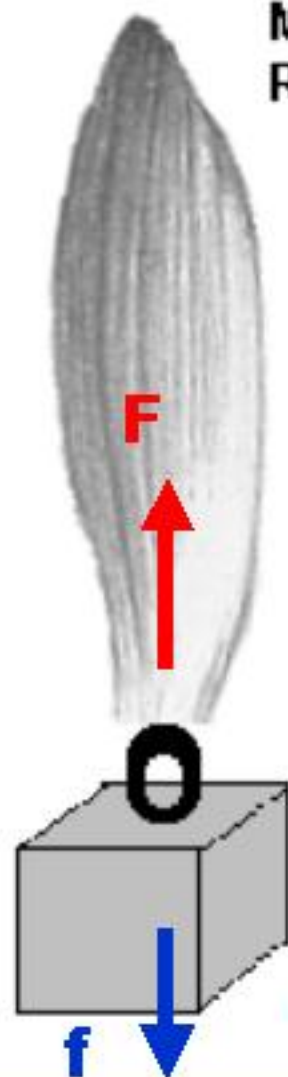
运动员动力的训练包括运动员的功率和效率。

功率：运动员总的作功能力，属于体能训练问题。

=运动时的阻力X运动速率(在此为频率)

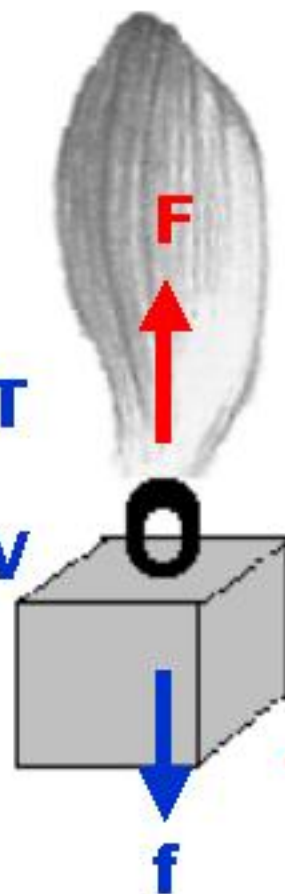
效率：运动员有用功水平能力，有用功和总功的比值，属于技能训练问题。

Muscle
Relax

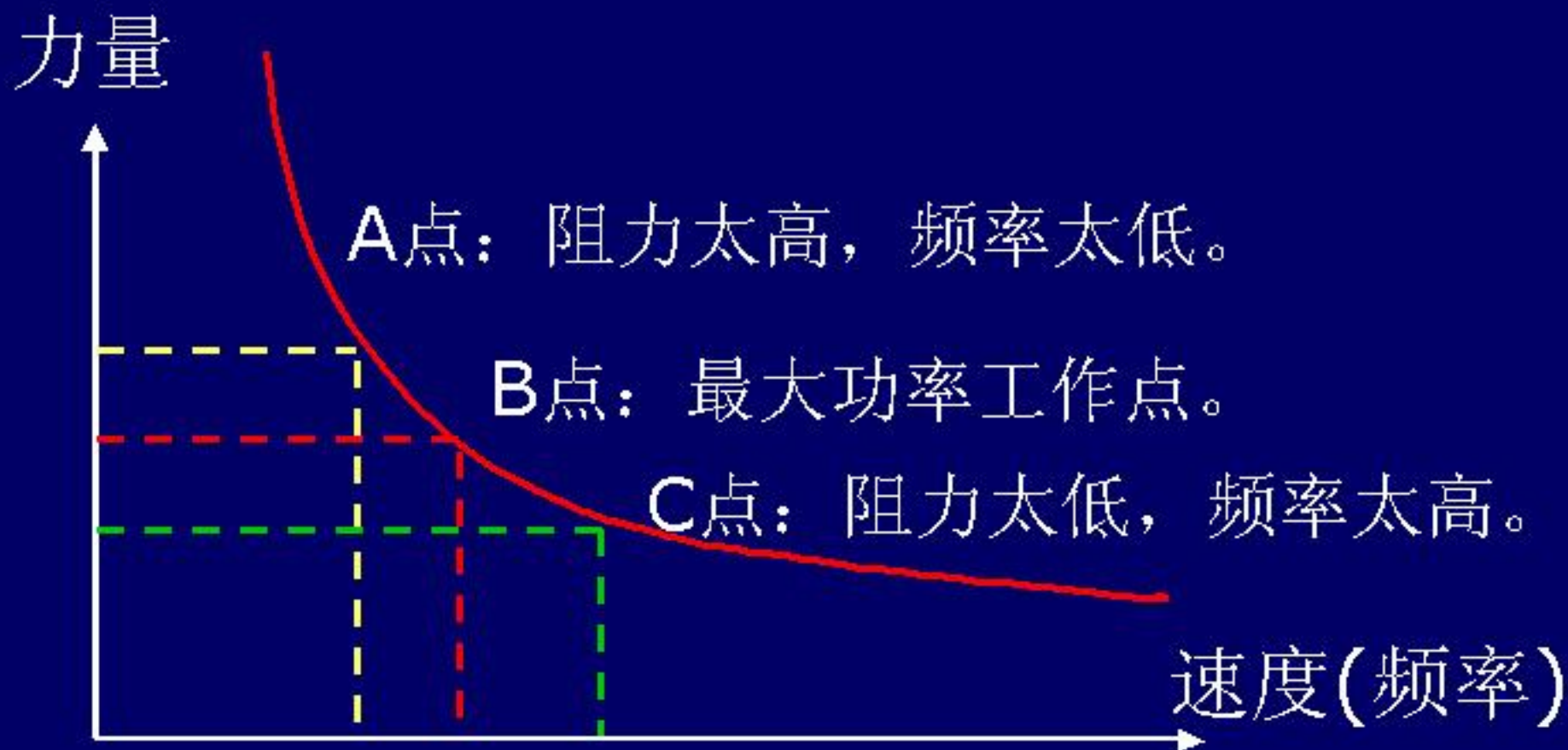


收缩距离: S
收缩时间: T
收缩速度: $V=S/T$
收缩力量: F
收缩功率: $P=F*V$

Muscle
Contract



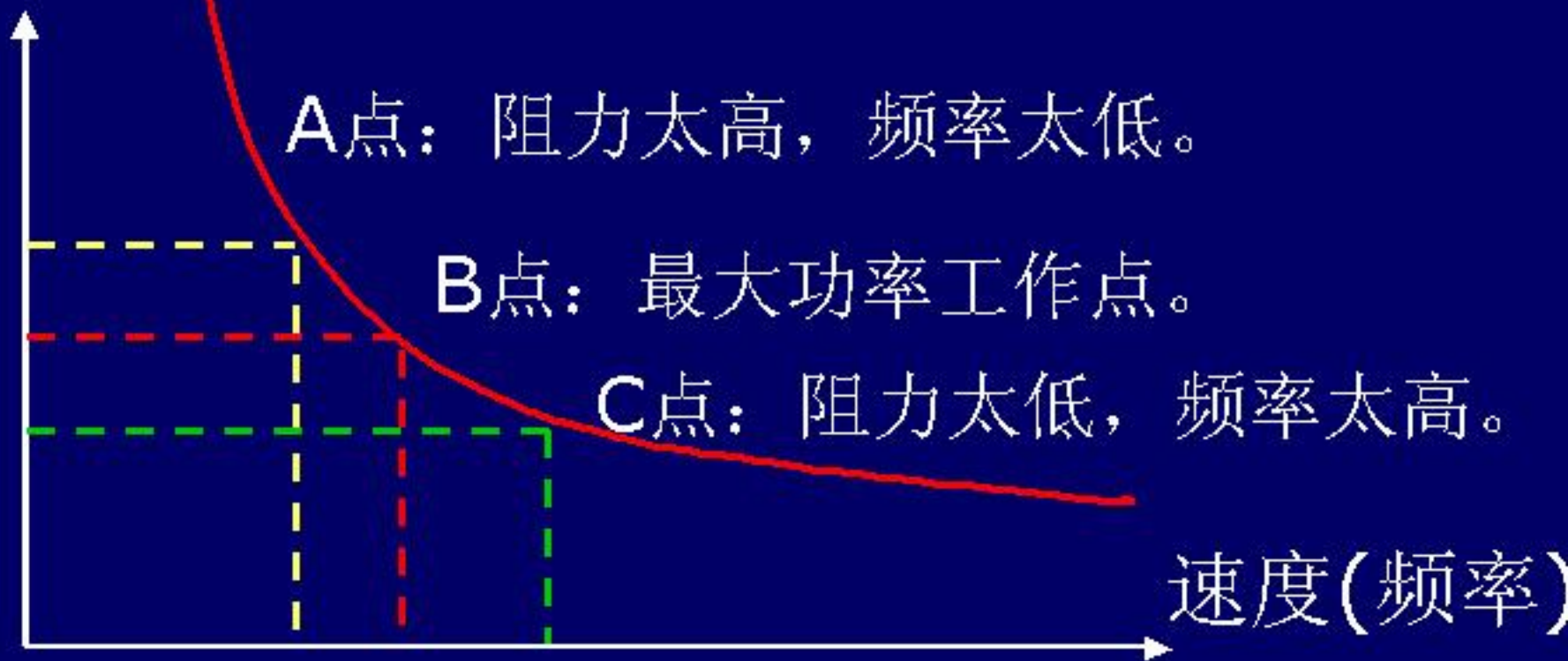
人体肌肉力量表现曲线（红实线）



专项最大功率的出现取决于环境阻力和选取与环境阻力相匹配的最佳传动比。

人体肌肉力量表现曲线（红实线）

力量



功率由力量和频率的乘积组成。但是力量是频率的起因，频率是力量的背景。力量是决定性的因素。这也是为什么我们今天重点讨论力量的原因。

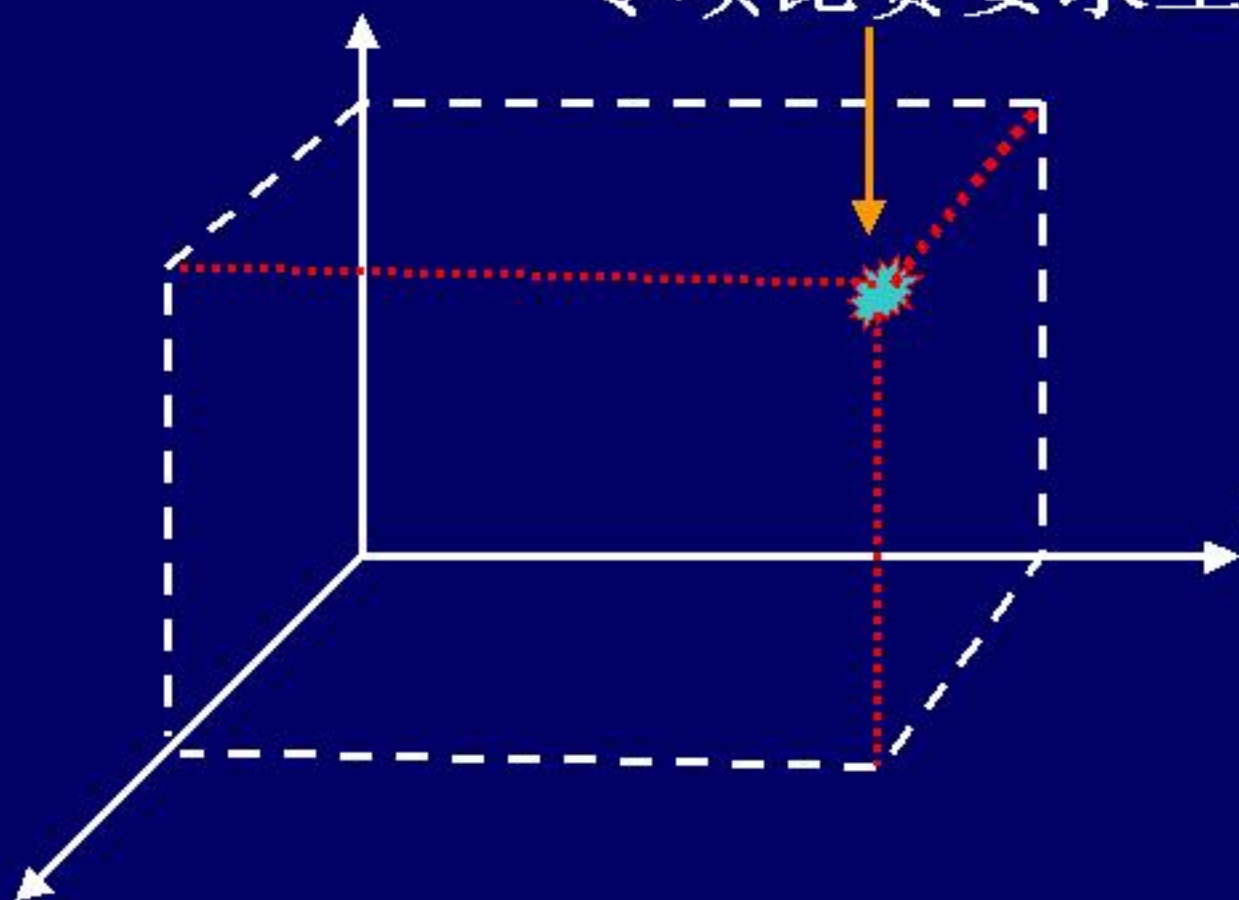
力量

专项比赛要求工作点

速度(频率)

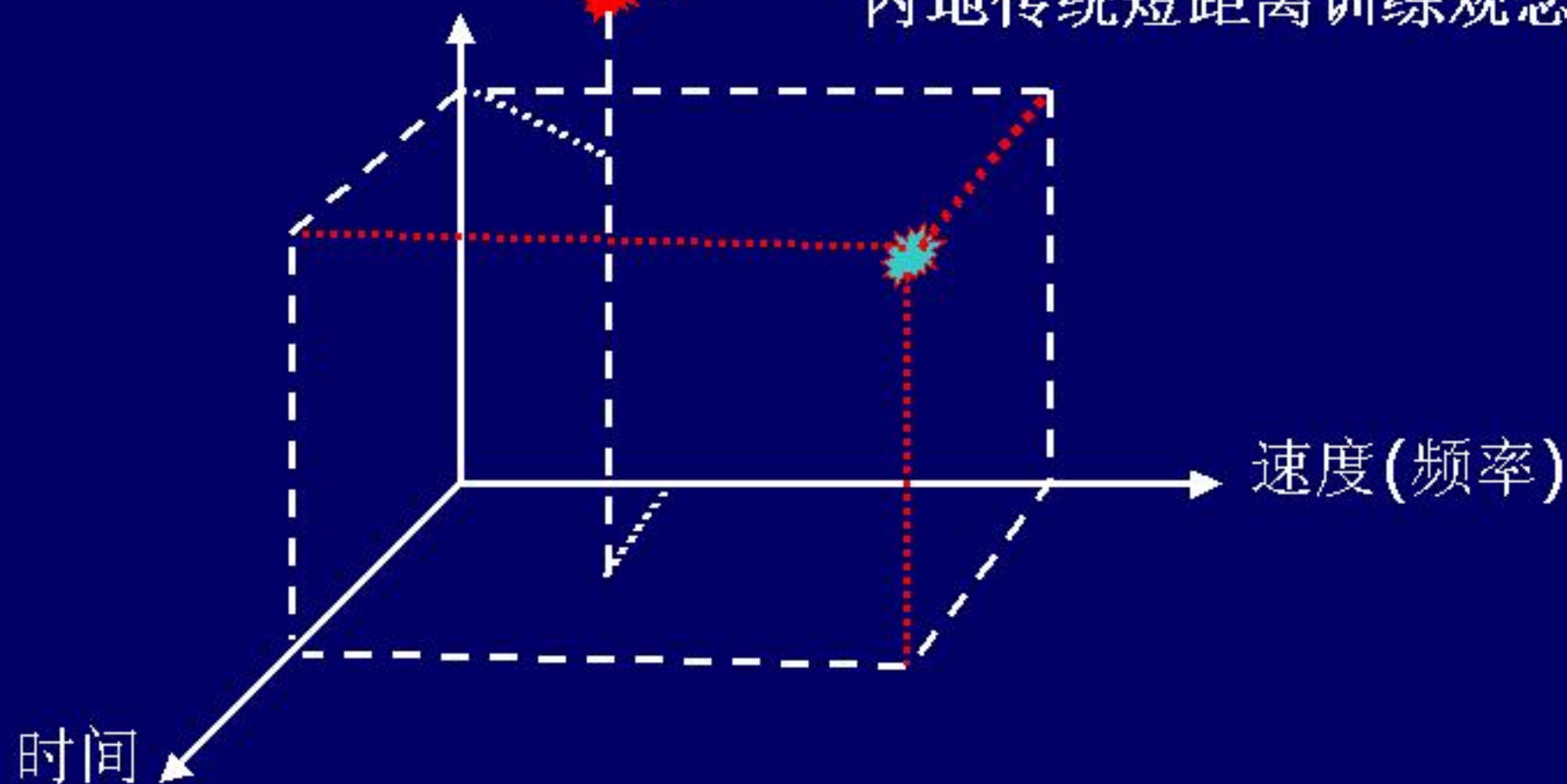
时间

阻力，频率和时间量的完全满足



力量

内地传统短距离训练观念

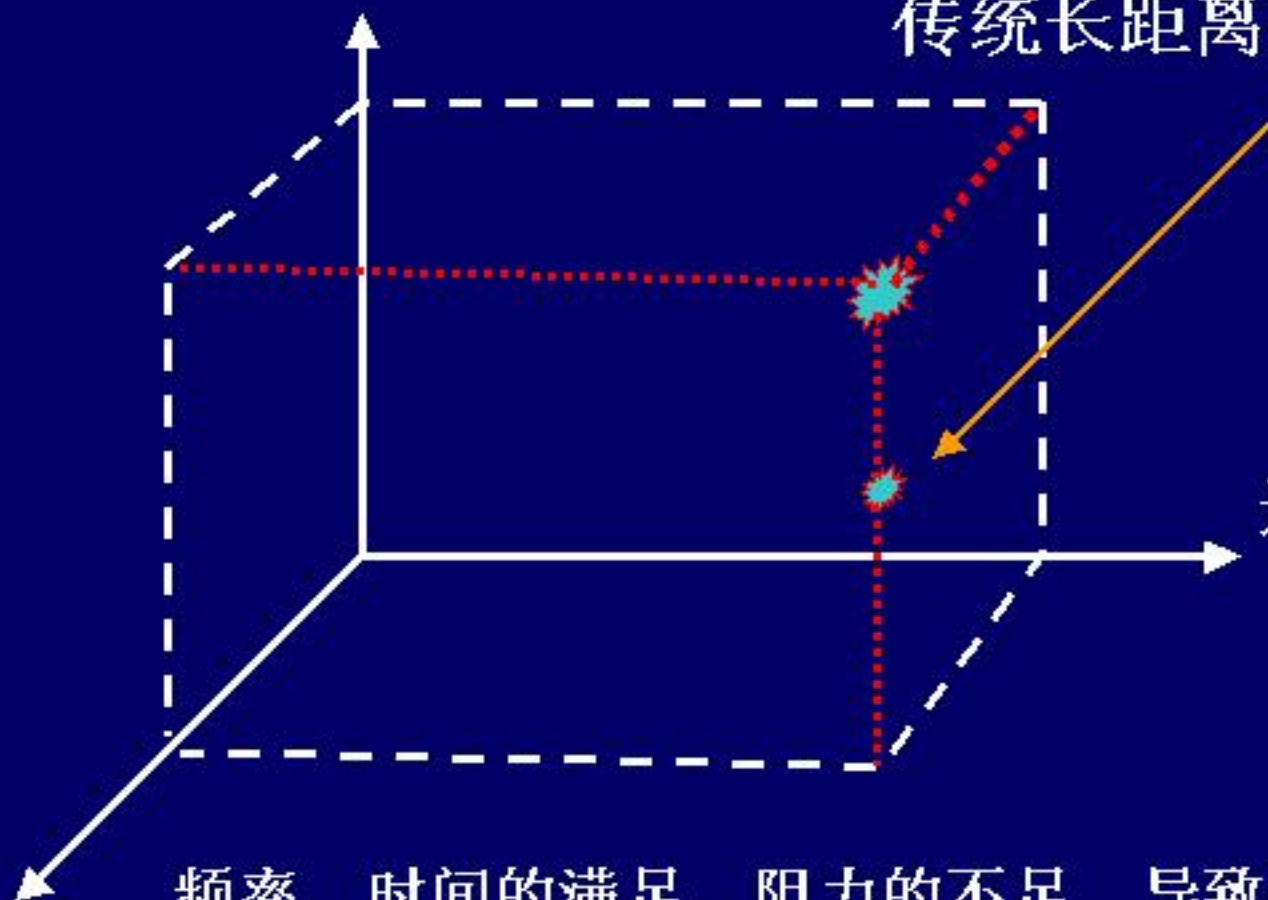


单纯追求过大的阻力，频率的低下，运动时间也不够。
导致训练模式和比赛要求相差较远。

力量

传统长距离训练观念

速度(频率)



频率, 时间的满足, 阻力的不足, 导致功率不足。

时间

结论：

- *短距离项目的专项能力不是简单的绝对力量，而是在该项目特征频率背景下的专项力量保持能力。
- *中长距离项目的专项能力不是简单的耐力。也是在该项目特征频率背景下的专项力量的保持能力。

这个结论透过了谓短距离和长距离的表面现象，直接在专项特征值的概念下认识力量的与耐力的问题。

本演讲的方法不仅仅适用于单车项目，而且适用于铁人三项，赛艇等周期性运动项目。

10运会小轮车夺金记实（录象一）



10运会小轮车夺金记实（录象二）



谢谢及提问