

## 2022 年作业题参考解答

### 第 1 章

1、(10 分) 写出三种不同形式的汽车动力方程（力平衡方程(展开)、动力特性方程、功率平衡方程），并说明式中各参数的含义和单位以及  $f$ 、 $C_D$ 、 $\delta$ 、 $\eta_T$  的常用取值范围。

答：三种不同形式的汽车动力方程：

$$(1) \text{ 力平衡方程: } \frac{T_{iq} i_g i_0 \eta_T}{r} = Gf \cos \alpha + \frac{C_D A u_a^2}{21.15} + G \sin \alpha + \delta m \frac{du}{dt}$$

式中：  $T_{iq}$  ——发动机转矩，[Nm]；

$i_g$  ——变速器的传动比；

$i_0$  ——主减速器的传动比（或主传动比）；

$\eta_T$  ——传动系的机械效率，轿车：0.9-0.92；货车、客车：0.82-0.85；

$r$  ——车轮半径，[m]；

$G$  ——汽车重力，[N]；

$f$  ——滚动阻力系数，良好沥青或混凝土路面，（ $f = 0.010 - 0.018$ ），常取  $f = 0.012 - 0.013$ ；

$\alpha$  ——道路坡度角，[°]；

$C_D$  ——空气阻力系数，典型轿车， $C_D = 0.3$  左右；

$A$  ——迎风面积，即汽车行驶方向上的投影面积，[m²]；

$u_a$  ——汽车的行驶速度，[km/h]；

$\delta$  ——汽车旋转质量换算系数，（ $\delta > 1$ ）；

$m$  ——汽车质量，[kg]；

$\frac{du}{dt}$  ——汽车行驶加速度，[m/s²]；

(2) 动力特性方程（或动力平衡方程）：

$$D = f \cos \alpha + \sin \alpha + \frac{\delta}{g} \frac{du}{dt} \quad \text{或} \quad D = f + i + \frac{\delta}{g} \frac{du}{dt} \quad \text{或} \quad D = \psi + \frac{\delta}{g} \frac{du}{dt} \quad (\text{答一种即可})$$

式中：  $D$  ——动力因数；

$f$  ——滚动阻力系数，良好沥青或混凝土路面，（ $f = 0.010 - 0.018$ ），常取  $f = 0.012 - 0.013$ ；

$\alpha$  ——道路坡度角，[°]；

$\delta$  ——汽车旋转质量换算系数， $\delta > 1$ ；

$\frac{du}{dt}$  ——汽车行驶加速度，[m/s²]；

$\psi$  ——道路阻力系数。

$$(3) \text{ 功率平衡方程: } P_e = \frac{u_a}{3600 \eta_T} \left( Gf \cos \alpha + \frac{C_D A u_a^2}{21.15} + G \sin \alpha + \delta m \frac{du}{dt} \right)$$

$$\text{或 } P_e = \frac{u}{\eta_T} (F_f + F_w + F_i + F_j)$$

式中：  $P_e$  ——发动机（有效）功率，[kW]；

$u_a$ ——汽车的行驶速度, [km/h];

$\eta_T$ ——传动系的机械效率, 轿车: 0.9-0.92; 货车、客车: 0.82-0.85;

$G$ ——汽车重力, [N];

$f$ ——滚动阻力系数, 良好沥青或混凝土路面,  $f = 0.010 - 0.018$ , 常取

$f = 0.012 - 0.013$ ;

$\alpha$ ——道路坡度角, [°];

$C_D$ ——空气阻力系数, 典型轿车,  $C_D = 0.3$ 左右;

$A$ ——迎风面积, 即汽车行驶方向上的投影面积, [m²];

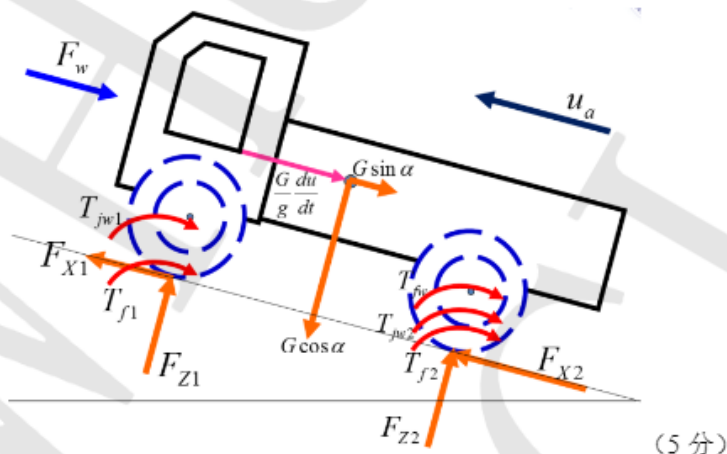
$\delta$ ——汽车旋转质量换算系数,  $\delta > 1$ ;

$m$ ——汽车质量, [kg];

$\frac{du}{dt}$ ——汽车行驶加速度, [m/s²].

**【评分标准】**本题共 10 分, 方程写错一个扣 2 分, 参数写错或写掉或范围错误每个扣 1 分, 直至扣完为止。参数不用重复写。

2、(10 分) 画出上坡加速行驶时整车受力图 (驱动方式为四驱), 并写出前后轮法向反力的表达式 (忽略旋转质量惯性力矩和滚动阻力偶矩)



**注意:**  $T_{fw}$  画在前、后轮处都可以。

前后轮法向反力的表达式为: (5 分)

$$\left. \begin{aligned} F_{Z1} &= F_{Zs1} - F_{Zw1} - \frac{G}{g} \frac{h_g}{L} \frac{du}{dt} \\ F_{Z2} &= F_{Zs2} - F_{Zw2} + \frac{G}{g} \frac{h_g}{L} \frac{du}{dt} \end{aligned} \right\}$$

其中

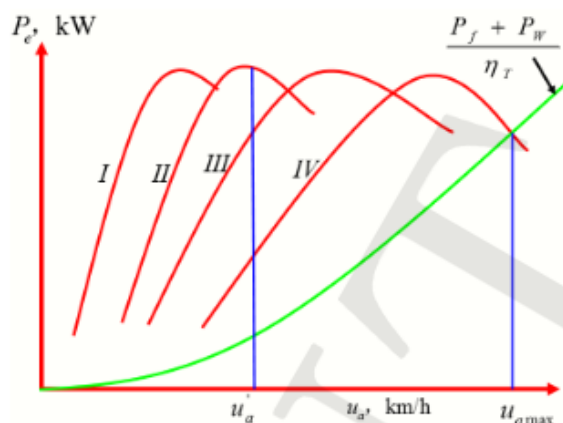
$$F_{Zs1} = G \left( \frac{b}{L} \cos \alpha - \frac{h_g}{L} \sin \alpha \right) \quad F_{Zs2} = G \left( \frac{a}{L} \cos \alpha + \frac{h_g}{L} \sin \alpha \right)$$

或将上述式子整理在一起。

**【评分标准】**本题共 10 分, 受力分析每缺 1 个或错 1 个扣 1 分, 表达式写错 1 个扣 2 分。

3、(15分) 简要作出某使用4档机械式变速器汽车的功率平衡图，分析车轮直径和变速器档位的改变对汽车动力性和经济性的影响。

答：如图为某4档汽车的功率平衡图。(5分)



车轮直径的改变对汽车动力性和经济性的影响：(6分)

汽车功率平衡图的纵坐标由发动机外特性功率  $P_e$  曲线决定。横坐标为车速，

$$\text{根据驱动力计算公式 } F_t = \frac{T_{t0} i_g i_0 \eta_T}{r},$$

在档位不变时，车轮直径  $d=2r$  的变化相当于档位传动比  $i_g$  的变化，即车轮直径  $d$  减小相当于档位传动比  $i_g$  增大。

因此车轮直径减小相当于变速器传动比增大，档位降低，如图所示，此时汽车后备功率增加，汽车动力性变好，而发动机负荷率降低，燃油消耗率增加，汽车燃油经济性变差；车轮直径增大相当于档位增加，汽车后备功率减小，汽车动力性变差，而发动机负荷率提高，燃油消耗率减小，汽车燃油经济性变好。

同时应注意：车轮直径减小通常在一定程度上导致轮胎与地面附着减小，从而影响汽车的动力性。

变速器档位的改变对汽车动力性和经济性的影响：(4分)

档位越低，汽车后备功率越大，汽车加速能力越好，汽车动力性越好；而档位越低，发动机负荷率越低，燃油消耗率越大，汽车燃油经济性越差。

【评分标准】本题共15分。作图5分，最高车速可以不指出， $u_a'$ 的竖直线不能缺；分析车轮直径时，红色字体可以不答；答案不完整或专业术语不准确酌情扣分。

4、(5分) 汽车空车与满载时相比，动力性有无变化？为什么？

答：空车、满载时汽车动力性有变化。

动力因数  $D$  的大小可直接反映动力性的优劣，根据动力因数  $D = \frac{F_t - F_w}{G}$ ，空车、满载时

$F_t$ 、 $F_w$  都无变化，而空车时  $G$  较小，因此动力因数  $D$  较大，因而动力性较好。

【评分标准】本题共5分。未用动力因数分析但分析出空车动力性更好的扣2分。

备注：5、6、7计算题：计算结果由于四舍五入位数、多步分解等原因误差在一定范围不扣分；多步分解方式不同或采用其他方法求解出结果也可。

5、(20分) 统计数据表明，装有0.5~2L排量发动机的轿车，若是前置发动机前轮驱动(FF)轿车，其平均的前轴负荷为汽车总重力的61.5%；若是前置发动机后轮驱动(FR)轿车，其平均的前轴负荷为汽车总重力的55.7%。设一轿车的轴距  $L=2.6\text{m}$ ，质心高度  $h=0.57\text{m}$ 。

(1) 试比较采用FF及FR形式时的附着力利用情况，分析时其前轴负荷率取相应形式的平均值。

(2) 确定上述FF轿车在  $\phi=0.2$  及  $0.7$  路面上的附着力，并求由附着力所决定的极限最高车速与极限最大爬坡度及极限最大加速度(在求最大爬坡度和最大加速度时可设  $F_w=0$ )。其它有关参数为： $m=1600\text{kg}$ ， $C_D=0.45$ ， $A=2.00\text{m}^2$ ， $f=0.02$ ， $\delta \approx 1.00$ 。

分析：本题的核心在于考察汽车的附着力、地面法向反作用力和作用在驱动轮上的地面切向反作用力的理解。应熟知公式(1-13)~(1-16)的意义和推导过程。

解：(1) **(6分)** 比较采用 FF 及 FR 形式时的附着力利用情况：

主要考虑车速不高加速上坡（等效坡度）情形

$$\text{对于 FF 轿车, } C_{\varphi 1} = \frac{F_{x1}}{F_{z1}} = \frac{F_{f2} + F_w + F_i + F'_j}{F_{z1} - F_{zw1} - m \frac{du}{dt} \frac{h_g}{L}} = \frac{q}{\frac{b}{L} - \frac{h_g}{L} q} = \frac{q}{0.615 - \frac{0.57}{2.6} q} \quad (2 \text{分})$$

$$\text{对于 FR 轿车, } C_{\varphi 2} = \frac{F_{x2}}{F_{z2}} = \frac{F_{f1} + F_w + F_i + F'_j}{F_{z2} - F_{zw2} - m \frac{du}{dt} \frac{h_g}{L}} = \frac{q}{\frac{a}{L} + \frac{h_g}{L} q} = \frac{q}{0.443 + \frac{0.57}{2.6} q} \quad (2 \text{分})$$

当  $C_{\varphi 1} \leq C_{\varphi 2}$

$$\text{则 } \frac{q}{0.615 - \frac{0.57}{2.6} q} \leq \frac{q}{0.443 + \frac{0.57}{2.6} q}, \text{ 解得 } q \leq 0.392 \quad (2 \text{分})$$

结论：当等效坡度小于 0.392 时，FF 轿车的附着率小于 FR 轿车，FF 轿车的附着利用率较高；当等效坡度大于 0.392 时，FR 轿车的附着率小于 FF 轿车，FR 轿车的附着利用率较高。

**【评分标准】** 本小题共 6 分。参考以上分步分；公式列出正确但计算错误或结论错误，每处扣 1 分。

(2) 解：1) FF 型轿车，平路上，

$$\varphi = 0.2 \text{ 时, } F_{\varphi} = F_{z\varphi} \varphi = mg \times 61.5\% \times \varphi = 1600 \times 9.8 \times 61.5\% \times 0.2 = 1928.64 \text{ N}$$

$$\varphi = 0.7 \text{ 时, } F_{\varphi} = F_{z\varphi} \varphi = mg \times 61.5\% \times \varphi = 1600 \times 9.8 \times 61.5\% \times 0.7 = 6750.24 \text{ N}$$

**(1+1=2分)**

2) 求极限最高车速：

$$\text{令 } C_{\varphi 1} = \varphi, \text{ 即 } C_{\varphi 1} = \varphi = \frac{F_{x1}}{F_{z1}} = \frac{F_{f2} + F_w + F_i + F'_j}{F_{z1} - F_{zw1} - \frac{G}{g} \frac{du}{dt} \frac{h_g}{L}} = \frac{F_{z2} f + \frac{C_D A u_{a\max}^2}{21.15}}{F_{z1}}$$

$$u_{a\max} = \sqrt{\frac{21.15(F_{z1}\varphi - F_{z2}f)}{C_D A}}$$

$$\varphi = 0.2 \text{ 时, } u_{a\max} = \sqrt{\frac{21.15 \times (1928.64 - 1600 \times 9.8 \times 38.5\% \times 0.02)}{0.45 \times 2}} = 206.1 \text{ km/h}$$

$$\varphi = 0.7 \text{ 时, } u_{a\max} = \sqrt{\frac{21.15 \times (6750.24 - 1600 \times 9.8 \times 38.5\% \times 0.02)}{0.45 \times 2}} = 394.7 \text{ km/h}$$

**(2+2=4分)**

$$\text{或: } F_{\varphi 1} = F_t = F_{f2} + F_w = G_2 f + \frac{C_D A u_{a\max}^2}{21.15}, \quad u_{a\max} = \sqrt{\frac{21.15(F_{\varphi 1} - G_2 f)}{C_D A}},$$

$$\varphi = 0.2 \text{ 时, } u_{a\max} = \sqrt{\frac{21.15 \times (1928.64 - 1600 \times 9.8 \times 38.5\% \times 0.02)}{0.45 \times 2}} = 206.1 \text{ km/h}$$

$$\varphi = 0.7 \text{ 时, } u_{\max} = \sqrt{\frac{21.15 \times (6750.24 - 1600 \times 9.8 \times 38.5\% \times 0.02)}{0.45 \times 2}} = 394.7 \text{ km/h}$$

3) 求极限最大爬坡度:

$$\text{令 } C_{\varphi 1} = \varphi, \text{ 即 } C_{\varphi 1} = \varphi = \frac{F_{x1}}{F_{z1}} = \frac{F_{f2} + F_w + F_i + F'_j}{F_{z1} - F_{zw1} - \frac{G}{g} \frac{du}{dt} \frac{h_g}{L}} = \frac{\frac{G}{L} (a \cos \alpha_{\max} + h_g \sin \alpha_{\max}) f + G \sin \alpha_{\max}}{\frac{G}{L} (b \cos \alpha_{\max} - h_g \sin \alpha_{\max})}$$

$$\varphi = 0.2 \text{ 时, } \alpha_{\max} = 5.4^\circ$$

$$i_{\max} = \tan \alpha_{\max} = \tan 5.4^\circ = 9.4\%$$

$$\varphi = 0.7 \text{ 时, } \alpha_{\max} = 19.0^\circ$$

$$i_{\max} = \tan \alpha_{\max} = \tan 19.0^\circ = 34.5\%$$

(2+2=4 分)

4) 求极限最大加速度:

$$\text{令 } C_{\varphi 1} = \varphi, \text{ 即 } C_{\varphi 1} = \varphi = \frac{F_{x1}}{F_{z1}} = \frac{F_{f2} + F_w + F_i + F'_j}{F_{z1} - F_{zw1} - m \frac{du}{dt} \frac{h_g}{L}} = \frac{mg \frac{a}{L} f + \delta m \frac{du}{dt}}{mg \frac{b}{L} - m \frac{du}{dt} \frac{h_g}{L}} \Bigg|_{\max}$$

注: 因此题所给条件不足 (缺转动惯量等参数,  $F'_j$  无法精确计算),  $\delta \approx 1.00$

$$\varphi = 0.2 \text{ 时, } \left. \frac{du}{dt} \right|_{\max} = 1.08 \text{ m/s}^2$$

$$\varphi = 0.7 \text{ 时, } \left. \frac{du}{dt} \right|_{\max} = 3.60 \text{ m/s}^2$$

(2+2=4 分)

【评分标准】本小题共 14 分。公式列出正确但计算错误, 每处扣 1 分。

6、(20 分) 一辆后轴驱动汽车的总质量 2152kg, 前轴负荷 52%, 后轴负荷 48%, 主传动比  $i_0=4.55$ , 变速器传动比: 一档: 3.79, 二档: 2.17, 三档: 1.41, 四档: 1.00, 五档: 0.86。质心高度  $h_g=0.57\text{m}$ ,  $C_D A=1.5\text{m}^2$ , 轴距  $L=2.300\text{m}$ , 飞轮转动惯量  $I_f=0.22\text{kg m}^2$ , 四个车轮总的转动惯量  $I_w=3.6\text{kg m}^2$ , 车轮半径  $r=0.367\text{m}$ 。该车在附着系数  $\varphi=0.6$  的路面上低速滑行曲线和直接档加速曲线如习题图 1 所示。图上给出了滑行数据的拟合直线  $v=19.76-0.59T$ ,  $v$  的单位 km/h,  $T$  的单位为 s, 直接档最大加速度  $a_{\max}=0.75\text{m/s}^2$  ( $u_a=50\text{km/h}$ )。设各档传动效率均为 0.90, 求:

1) 汽车在该路面上的滚动阻力系数。(5 分)

2) 求直接档的最大动力因数。(5 分)

3) 在此路面上该车的最大爬坡度。(10 分)

解: 1) 汽车空档在路面上滑行时, 驱动力为 0, 飞轮空转, 旋转质量换算系数中飞轮项为 0。

$$\delta = 1 + \frac{\sum I_w}{mr^2} = 1 + \frac{3.6}{2152 \times 0.367^2} = 1.0124. \quad (2 \text{ 分})$$

考虑滑行时车速较低, 忽略空气阻力。

$$\text{行驶方程式变为: } F_t = F_f + F_j = 0, \text{ 即 } Gf + \delta m \frac{du}{dt} = 0.$$



根据滑行数据的拟合直线可得:  $\frac{du}{dt} = -\frac{0.59}{3.6} = -0.164 \text{ m/s}^2$ , (2分)

代入  $\frac{du}{dt} = -\frac{Gf}{\delta m}$ , 解得:  $f = -\frac{\delta}{g} \frac{du}{dt} = \frac{1.0124}{9.81} \times 0.164 = 0.0169$ . (1分)

【评分标准】本小题共5分。参考以上分步分;公式列出正确但计算错误,每处扣1分。

$$2) \text{ 直接档: } \delta = 1 + \frac{\sum I_w}{mr^2} + \frac{I_f i_4^2 i_0^2 \eta_T}{mr^2} = 1 + \frac{3.6}{2152 \times 0.367^2} + \frac{0.22 \times 1^2 \times 4.55^2 \times 0.9}{2152 \times 0.367^2} = 1.0265.$$

(2分)

动力因数:  $D = f + \frac{\delta du}{g dt}$ .

$$\text{最大动力因数: } D_{4\max} = f + \frac{\delta}{g} a_{\max} = 0.0169 + \frac{1.0265}{9.8} \times 0.75 = 0.0955. (3分)$$

【评分标准】本小题共5分。参考以上分步分;公式列出正确但计算错误,每处扣1分。

$$3) \text{ 由动力因数的定义, 直接档的最大驱动力: } F_{t4\max} = F_W + D_{4\max} G = \frac{T_{tq\max} i_4 i_0 \eta_T}{r}$$

$$\text{即 } \frac{C_D A u_a^2}{21.15} + D_{4\max} G = \frac{T_{tq\max} i_4 i_0 \eta_T}{r}, \text{ 代入数据:}$$

$$\frac{1.5 \times 50^2}{21.15} + 0.0955 \times 2152 \times 9.81 = \frac{T_{tq\max} \times 1 \times 4.55 \times 0.9}{0.367}, \text{ 解得 } T_{tq\max} = 196.58 \text{ Nm}. (3分)$$

最大爬坡度是指一档时的最大爬坡度(忽略空气阻力):

$$D_{1\max} = \frac{T_{tq\max} i_1 i_0 \eta_T}{r G} = \frac{196.58 \times 3.79 \times 4.55 \times 0.9}{0.367 \times 2152 \times 9.81} = 0.394$$

$$i_{\max} = \tan \alpha_{\max} = \tan \left( \arcsin \frac{D_{1\max} - f \sqrt{1 - D_{1\max}^2 + f^2}}{1 + f^2} \right) \\ = \tan \left( \arcsin \frac{0.394 - 0.0169 \sqrt{1 - 0.394^2 + 0.0169^2}}{1 + 0.0169^2} \right) = 0.409 (3分)$$

$$\text{或 } \frac{T_{tq\max} i_1 i_0 \eta_T}{r} = G f + G i_{\max},$$

$$\text{代入数据: } \frac{196.58 \times 3.79 \times 4.55 \times 0.9}{0.367} = 2152 \times 9.8 (0.0169 + i_{\max})$$

$$\text{解得 } i_{\max} = 0.3773$$

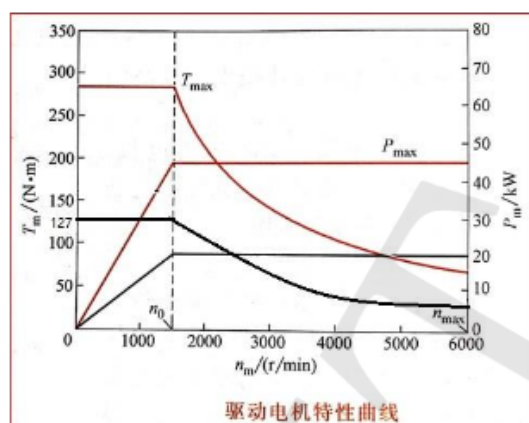
由地面附着条件, 该汽车可能通过的最大坡度为:

$$q = \frac{a/L}{1/\varphi - h_g/L} = \frac{0.48}{1/0.6 - 0.57/2.3} = 0.338.$$

因地面附着条件限制, 该车的最大爬坡度为 33.8%. (4分)

【评分标准】本小题共10分。参考以上分步分;公式列出正确但计算错误或结论错误,每处扣1分。

7. (1) 该电机的转速-转矩特性曲线如下图。



【评分标准】本小题共 4 分。教材上额定转矩曲线有错误，最大额定转矩 127N $\cdot$ m，如果与教材曲线一样扣 1 分。

(2) 当车速为 150km/h,

$$F = F_f + F_w = 0.026 \times 150 \times 150 + 1.03 \times 150 + 130.76 = 870.26 \text{ N} \quad (2 \text{ 分})$$

$$P_f + P_w = 870.26 \times 150 / 3.6 / 1000 = 36.261 \text{ kW} \quad (2 \text{ 分})$$

由于连续等速行驶 10min 以上，电机功率不能选用峰值功率，选用额定功率 20kW，双电机额定功率 40kW

$P_f + P_w = 36.261 \text{ kW} < 40 \text{ kW}$ ，可以以 150km/h 的车速在水平良好路面连续等速行驶 10min 以上  
(2 分)

【评分标准】本小题共 6 分。参考以上分步分；公式列出正确但计算错误或结论错误，每处扣 1 分。

(3) 爬坡时间少于 1min，选用电机峰值转矩，电机峰值转矩为 287N $\cdot$ m (2 分)

$$\text{双电机驱动力最大值为 } F_{\text{tmax}} = 2 \times 287 \times 3 / 0.3 = 5740 \text{ N} \quad (1 \text{ 分})$$

当车速为 20km/h 时，

$$F = F_f + F_w = 0.026 \times 20 \times 20 + 1.03 \times 20 + 130.76 = 161.76 \text{ N} \quad (1 \text{ 分})$$

$$\text{此时最大爬坡度为 } i = \tan\{\arcsin[F_{\text{tmax}} - (F_f + F_w)] / G\} = 35.5\% \quad (2 \text{ 分})$$

【评分标准】本小题共 6 分。参考以上分步分；公式列出正确但计算错误或结论错误，每处扣 1 分。

$$(4) \quad q = \frac{a/L}{\frac{1}{\varphi} - \frac{h_g}{L}} = \frac{1.45/2.7}{\frac{1}{0.7} - \frac{0.6}{2.7}} = 44.5\% > 35.5\%,$$

该车在附着系数为 0.7 的路面上的最大爬坡度为 35.5%。(4 分)

【评分标准】本小题共 4 分。参考以上分步分；公式列出正确但计算错误或结论错误，每处扣 1 分。

## 第2章

1、(10分)“车开得慢，油门踩得小，就一定省油”，或者“只要发动机省油，汽车就一定省油”这两种说法对不对？

答：这两种说法都不对。

1) 由汽车等速百公里燃油消耗量曲线，汽车一般在接近低速的中等车速时燃油消耗量最低，并不是车速越低越省油；在相同车速下是否节油取决于由发动机的负荷率决定的燃油消耗率，油门踩得小往往发动机负荷率较低，燃油消耗率较高。(5分)

2) 发动机的经济性指标是燃油消耗率，而汽车燃油经济性的评价指标是百公里油耗  $Q_s$ ，由汽车等速百公里燃油消耗量计算公式  $Q_s = \frac{P_e b}{1.02 u_a \rho g}$ ，汽车油耗不仅与发动机燃油消耗率

有关，而且还与发动机功率以及车速（或汽车行驶阻力及传动系的机械效率）有关，同时负荷率对燃油消耗率也有很重要的影响，因此发动机省油时汽车不一定就省油。(5分)

2、(5分)试述无级变速器与汽车动力性、燃油经济性的关系。

答：1) 档位数无限多的无级变速器，使发动机可能总工作在最大功率  $P_{\text{emax}}$  处，即具有与等功率发动机汽车同样的动力性，改善了汽车的动力性。(2分)

2) 使用档数无限多的无级变速器，在任何条件下都提供了使发动机在最经济工况下工作的可能性，即工作在最低燃油消耗率曲线上，显著提高了汽车的燃油经济性。(3分)

3、(10分)轮胎对汽车动力性、燃油经济性有些什么影响？

答：(1) 轮胎的结构型式（包括帘线和橡胶的品种等）：子午线轮胎比普通斜交胎滚动阻力小，动力性、燃油经济性均好。(2分)

(2) 轮胎直径：车轮直径减小相当于档位降低，汽车后备功率增大，加速能力增强，汽车动力性好，而发动机负荷率降低，燃油消耗率增加，汽车燃油经济性差。但车轮直径减小通常在一定程度上导致轮胎与地面附着减小，会影响汽车动力性。(2分)

(3) 轮胎扁平率：轮胎扁平率越小，轮胎宽度增大，滚动阻力增大，但路面附着条件变好；一定驱动力下扁平率越小，动力性、经济性较差，但大驱动力下由于附着良好动力性改善。(2分)

(4) 轮胎花纹：影响附着系数，从而影响汽车动力性。(2分)

(5) 轮胎气压：气压越高，滚动阻力越小，在一定驱动力下，动力性、经济性较好，但大驱动力下由于易产生滑动，滚动阻力增大，动力性、经济性变差。(2分)

4、(10分)达到动力性最佳换档时机是什么？达到燃油经济性的最佳换档时机是什么？二者是否相同？

答：两者不相同。

1) 达到动力性最佳的换档时机是加速度倒数-车速关系图中各档加速度倒数曲线交点对应车速，保证其覆盖面积（加速时间）最小；若相邻档位加速度倒数曲线没有交点，最佳换档时机为低档加速度倒数曲线最右端对应车速。(5分)

2) 达到燃油经济性的换档时机可根据由“最小燃油消耗特性”确定的无级变速器的调速特性，考虑道路的  $\psi$  值，在最接近调速特性曲线的点进行换档。简单而言，燃油经济性最佳的换档时机是满足动力性前提下，尽可能早的换入高档。(5分)

5、(10分)为什么混合动力汽车比较省油？

答：1) 只需要采用能够满足汽车巡航需要的较小的发动机，由电能提供汽车加速、爬坡时



所需的附加动力, 因此提高了发动机的负荷率。(3分)

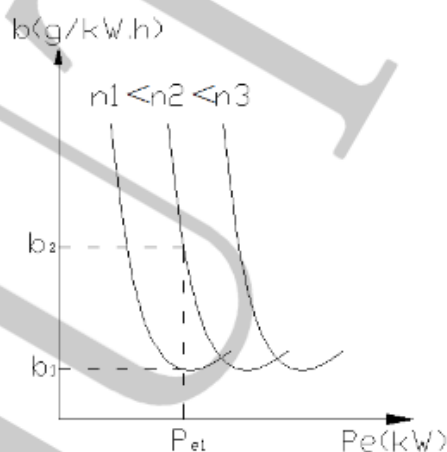
2) 可以控制发动机在高效、低污染的区域运行, 发动机的功率不满足车辆驱动需求时, 由动力蓄电池来补偿; 发动机功率过剩时, 剩余功率可用于电池充电。(3分)

3) 由于具有电机、电源系统, 可以方便地回收汽车减速、制动、下坡时的能量。(2分)

4) 在车辆频繁启停的拥堵路况, 可以关闭发动机, 以纯电方式运行, 从而消除发动机的怠速能耗, 真正实现零排放。(2分)

6、(10分) 写出根据汽车发动机的负荷特性曲线得到汽车等速百公里燃油消耗量曲线的方法和步骤, 并写出有关计算公式及公式中各参数的单位。

答: 如图为汽车发动机的负荷特性曲线。



汽车发动机负荷特性曲线

(1) 汽车以某挡某车速  $u_{a1}$  等速行驶, 利用汽车功率平衡方程可计算得到该车速下等速平路

行驶时发动机输出的功率; 
$$P_{e1} = \frac{1}{\eta_T} (P_{fi} + P_{wl}) = \frac{u_{a1}}{3600\eta_T} \left( Gf\cos\alpha + \frac{C_D A u_{a1}^2}{21.15} \right)$$

公式中, 各物理量的单位为  $u_{a1}(\text{km/h})$ ,  $G(\text{N})$ ,  $\alpha(^{\circ})$ ,  $A(\text{m}^2)$ ,  $C_D$ ,  $\eta_T$ ,  $f$  无量纲。(2分)

(2) 由式可计算该挡  $u_{a1}$  行驶时的发动机转速  $n_{e1}$ ; 
$$u_{a1} = 0.377 \frac{r \cdot n_{e1}}{i_g \cdot i_0}$$

公式中, 各物理量的单位为  $u_a(\text{km/h})$ ,  $r(\text{m})$ ,  $n(\text{r/min})$ ,  $i_g$ ,  $i_0$  无量纲。(2分)

(3) 在汽车发动机负荷特性曲线上, 由上述的  $P_{e1}$  和  $n_{e1}$  插值得到  $b_1$ ; (2分, 含负荷特性曲线, 未画曲线不扣分)

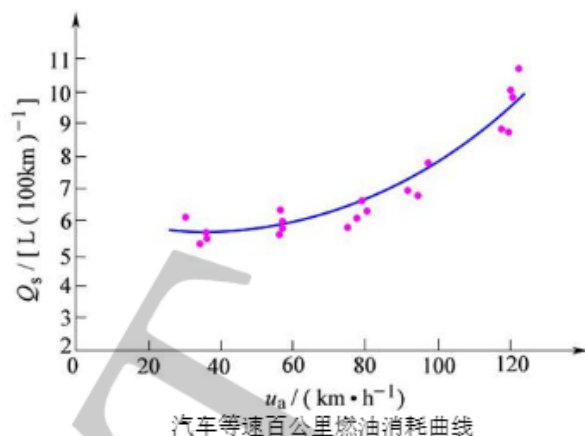
(4) 将上述得到的  $P_{e1}$  和  $b_1$  及其它已知参数代入计算式中, 可计算得到  $Q_{s-u_{a1}}$ ;

$$Q_{s-u_{a1}} = \frac{P_{e1} b_1}{1.02 u_{a1} \rho g}$$

公式中, 各物理量的单位为  $Q_s(\text{L}/100\text{km})$ ,  $P_e(\text{kW})$ ,  $b(\text{g}/\text{kW h})$ ,  $u_a(\text{km/h})$ ,  $\rho(\text{kg}/\text{L})$ ,  $g(\text{m}/\text{s}^2)$ 。

(2分)

(5) 另选择上述档位的车速  $u_{a2}$ , 同样的方法可得  $Q_{u_{a2}}$ , 以此类推, 得到该档多个车速下的不同  $Q_s$  值, 描点作图即得汽车等速百公里燃油消耗曲线, 如下图所示。(2分, 含曲线, 未画曲线不扣分)



5、(15 分) 某纯电动 SUV 基本参数如下：满载总质量 2900kg，迎风面积 3m<sup>2</sup>，空气阻力系数 0.29，轮胎型号 265/45 R21，传动系总效率 0.93，旋转质量换算系数 1.15，电机及控制器效率 0.92，蓄电池总容量 70kWh，蓄电池平均放电效率 0.95，制动能量回收比例系数为 0.5，求如下两种工况的续驶里程：

1) 60km/h 等速行驶；2) 循环行驶：车速从 0 加速到 50km/h 用时 16s，再以 50km/h 等速行驶 30s，最后减速行驶到停车用时 15s。

答：(1) 60km/h 等速工况电机需提供的功率为

$$P_m = \frac{u_a}{3600\eta_T} \left( Gf + \frac{C_D A u_a^2}{21.15} \right) = \frac{60}{3600 \times 0.93} \times \left( 2900 \times 9.8 \times 0.012 + \frac{0.29 \times 3 \times 60^2}{21.15} \right) = 8.766 \text{ kW}$$

等速工况所消耗的电能为

$$Q_t = \frac{1}{3.6} \int_0^{t_i} \frac{P_m}{\eta_b \eta_m} dt = \frac{1}{3.6} \int_0^{t_i} \frac{8.766}{0.95 \times 0.92} dt = 2.786 t_i$$

$$\text{蓄电池总容量为 } 70 \text{ kWh, 有 } 2.786 t_i = 70 \times 1000 \quad t_i = \frac{70 \times 1000}{2.786} = 25126 \text{ s}$$

$$\text{电动汽车的续驶里程为: } s_t = \frac{u_a}{3600} \times t_i = \frac{60}{3600} \times 25126 = 418.77 \text{ km}$$

(2) 循环行驶工况：

等加速工况：

$$\text{加速度: } \frac{du}{dt} = \frac{1}{3.6} \frac{u_{a2} - u_{a1}}{t_a} = \frac{50}{3.6 \times 16} = 0.868 \text{ m/s}$$

方法 (1)

$$\text{则 } du = 0.868 dt \quad u_a = 3.6 \int_0^t 0.868 dt = 3.125 t$$

等加速工况电机提供的功率为

$$P_m = \frac{u_a}{3600\eta_T} \left( Gf + \frac{C_D A u_a^2}{21.15} + \delta m \frac{du}{dt} \right)$$

等加速工况所消耗的电能为

$$Q_a = \frac{1}{3.6} \int_0^{t_i} \frac{P_m}{\eta_b \eta_m} dt \quad Q_a = \frac{1}{3.6 \times 3.125} \int_0^{u_i} \frac{P_m}{\eta_b \eta_m} du_a$$

将  $P_m$  和  $u_a = 3.125 t$  代入得

$$\begin{aligned}
 Q_a &= \frac{1}{3.6} \times \int_0^{t_a} \frac{3.125t}{3600 \times 0.93} \times \left( 2900 \times 9.8 \times 0.012 + \frac{0.29 \times 3 \times (3.125t)^2}{21.15} + 1.15 \times 2900 \times 0.868 \right) dt \\
 &= \frac{3.125}{3.6 \times 0.95 \times 0.92 \times 3600 \times 0.93} \times \int_0^{t_a} 3235.8t + 0.4017t^3 \\
 &= \frac{3.125}{3.6 \times 0.95 \times 0.92 \times 3600 \times 0.93} \times (1617.9t_a^2 + 0.1004t_a^4) \\
 &= \frac{3.125}{3.6 \times 0.95 \times 0.92 \times 3600 \times 0.93} \times (1617.9 \times 16^2 + 0.1004 \times 16^4) \\
 &= 124.8 \text{ W} \cdot \text{h}
 \end{aligned}$$

方法 (2)

$$dt = \frac{du_a}{3.125}$$

$$Q_a = \frac{1}{3.6 \times 3.125} \int_0^{u_a} \frac{P_m}{\eta_b \eta_m} du_a$$

$$\begin{aligned}
 Q_a &= \frac{1}{3.6 \times 3.125} \int_0^{u_a} \frac{P_m}{\eta_b \eta_m} du_a = \frac{1}{3.6 \times 3.125} \int_0^{u_a} \frac{\frac{u_a}{3600 \times \eta_T} \left( Gf + \frac{C_D A u_a^2}{21.15} + \delta m \frac{du}{dt} \right)}{\eta_b \eta_m} du_a \\
 &= \frac{1}{3.6 \times 3.125} \times \int_0^{u_a} \frac{\frac{u_a}{3600 \times 0.93} \times \left( 2900 \times 9.8 \times 0.012 + \frac{0.29 \times 3 \times u_a^2}{21.15} + 1.15 \times 2900 \times 0.868 \right)}{0.95 \times 0.92} du_a \\
 &= \frac{1}{3.6 \times 3.125 \times 0.95 \times 0.92 \times 3600 \times 0.93} \times \int_0^{u_a} (3235.8u_a + 0.0411u_a^3) du_a \\
 &= \frac{1}{3.6 \times 3.125 \times 0.95 \times 0.92 \times 3600 \times 0.93} \times (1617.5u_a^2 + 0.0103u_a^4) \\
 &= \frac{1}{3.6 \times 3.125 \times 0.95 \times 0.92 \times 3600 \times 0.93} \times (1617.5 \times 50^2 + 0.0103 \times 50^4) \\
 &= 124.8 \text{ W} \cdot \text{h}
 \end{aligned}$$

$$\text{等加速工况电动汽车的续驶里程为: } s_a = \frac{u_{a2}^2 - u_{a1}^2}{25.92 \frac{du}{dt}} = \frac{50^2}{25.92 \times 0.868} = 111.11 \text{ m}$$

等减速工况

$$\text{减速度为 } \frac{du}{dt} = \frac{1}{3.6} \frac{u_{a2} - u_{a3}}{t_d} = \frac{50}{3.6 \times 15} = 0.926 \text{ m/s}$$

$$dt = \frac{du_a}{3.334}$$

等减速工况所消耗的电能为

$$\begin{aligned}
 Q_a &= \frac{1}{3.6 \times 3.334} \int_0^{u_a} P_m \eta_b \eta_m du_a = \frac{1}{3.6 \times 3.334} \int_0^{u_a} \frac{\varphi \eta_b \eta_m u_a}{3600 \times \eta_T} \left( \delta m \frac{du}{dt} - Gf - \frac{C_D A u_a^2}{21.15} \right) du_a \\
 &= \frac{1}{3.6 \times 3.334} \times \int_0^{u_a} \frac{0.5 \times 0.95 \times 0.92 u_a}{3600 \times 0.93} \times \left( 1.15 \times 2900 \times 0.926 - 2900 \times 9.8 \times 0.012 - \frac{0.29 \times 3 \times u_a^2}{21.15} \right) du_a \\
 &= \frac{0.5 \times 0.95 \times 0.92}{3.6 \times 3.334 \times 3600 \times 0.93} \times \int_0^{u_a} (2747.2 u_a - 0.0411 u_a^3) du_a \\
 &= \frac{0.5 \times 0.95 \times 0.92}{3.6 \times 3.334 \times 3600 \times 0.93} \times (1373.6 u_a^2 - 0.0103 u_a^4) \\
 &= \frac{0.5 \times 0.95 \times 0.92}{3.6 \times 3.334 \times 3600 \times 0.93} \times (1373.6 \times 50^2 - 0.0103 \times 50^4) \\
 &= 36.64 \text{ W} \cdot \text{h}
 \end{aligned}$$

等减速工况电动汽车的续驶里程为:  $s_d = \frac{u_{a2}^2 - u_{a1}^2}{25.92 \frac{du}{dt}} = \frac{50^2}{25.92 \times 0.926} = 104.16 \text{ m}$

50km/h 等速工况电机需提供的功率为

$$P_m = \frac{u_a}{3600 \eta_T} \left( Gf + \frac{C_D A u_a^2}{21.15} \right) = \frac{50}{3600 \times 0.93} \times \left( 2900 \times 9.8 \times 0.012 + \frac{0.29 \times 3 \times 50^2}{21.15} \right) = 6.63 \text{ kW}$$

等速工况所消耗的电能为  $Q_t = \frac{1}{3.6} \int_0^{t_i} \frac{P_m}{\eta_b \eta_m} dt = \frac{1}{3.6} \int_0^{t_i} \frac{6.63}{0.95 \times 0.92} dt = 2.107 \times 30 = 63.21 \text{ W} \cdot \text{h}$

等速工况电动汽车的续驶里程为:  $s_t = \frac{u_a}{3600} \times t_t = \frac{50}{3600} \times 30 = 0.4167 \text{ km} = 416.7 \text{ m}$

单个循环工况消耗的电能为

$$Q_{20} = Q_t + Q_a - Q_d = 63.21 + 124.8 - 36.64 = 151.37 \text{ W} \cdot \text{h}$$

单个循环工况消耗的续驶里程为

$$s_0 = s_t + s_a + s_d = 416.7 + 111.11 + 104.16 = 631.97 \text{ m}$$

电池容量为 70kWh 的续驶里程为  $s_z = s_0 \frac{Q_z}{Q_{20}} = 631.97 \times \frac{70 \times 1000}{151.37} = 292.3 \text{ km}$

7、(15 分) 某纯电动大客车基本参数如下: 满载总质量 17000kg, 迎风面积 8m<sup>2</sup>, 空气阻力系数 0.6, 传动系总效率 0.92, 旋转质量换算系数 1.29, 电机及控制器效率 0.9, 蓄电池总容量 250kWh, 蓄电池平均放电效率 0.95, 制动能量回收比例系数为 0.5, 求如下两种工况的续驶里程 (滚动阻力系数 f 取 0.012)。

1) 60km/h 等速行驶; 2) 循环行驶: 车速从 0 加速到 32km/h 用时 12s, 再以 32km/h 等速行驶 24s, 最后减速行驶到停车用时 11s。

答: (1) 60km/h 等速工况电机需提供的功率为

$$P_m = \frac{u_a}{3600 \eta_T} \left( Gf + \frac{C_D A u_a^2}{21.15} \right) = \frac{60}{3600 \times 0.92} \times \left( 17000 \times 9.8 \times 0.012 + \frac{0.6 \times 8 \times 60^2}{21.15} \right) = 51.02 \text{ kW}$$

(2 分)

等速工况所消耗的电能为  $Q_t = \frac{1}{3.6} \int_0^{t_i} \frac{P_m}{\eta_b \eta_m} dt = \frac{1}{3.6} \int_0^{t_i} \frac{51.02}{0.95 \times 0.9} dt = 16.58 t_i$

蓄电池总容量为 250kWh, 有  $16.58 t_i = 250 \times 1000$   $t_i = \frac{250 \times 1000}{16.58} = 15078 \text{ s}$

电动汽车的续驶里程为:  $s_t = \frac{u_a}{3600} \times t_t = \frac{60}{3600} \times 15078 = 251.3 \text{ km}$  (2分)

(2) 循环行驶工况:

等加速工况:

加速度:  $\frac{du}{dt} = \frac{1}{3.6} \frac{u_{a2} - u_{a1}}{t_a} = \frac{32}{3.6 \times 12} = 0.741 \text{ m/s}$

方法 (1)

则  $du = 0.741 dt$        $u_a = 3.6 \int_0^t 0.741 dt = 2.668t$

等加速工况电机提供的功率为  $p_m = \frac{u_a}{3600\eta_T} \left( Gf + \frac{C_D A u_a^2}{21.15} + \delta m \frac{du}{dt} \right)$

等加速工况所消耗的电能为  $Q_a = \frac{1}{3.6} \int_0^{t_a} \frac{P_m}{\eta_b \eta_m} dt$

将  $P_m$  和  $u_a = 2.668t$  代入得

$$\begin{aligned} Q_a &= \frac{1}{3.6} \times \int_0^{t_a} \frac{\frac{2.668t}{3600 \times 0.92} \times \left( 17000 \times 9.8 \times 0.012 + \frac{0.6 \times 8 \times (2.668t)^2}{21.15} + 1.29 \times 17000 \times 0.741 \right)}{0.95 \times 0.9} dt \\ &= \frac{2.668}{3.6 \times 0.95 \times 0.9 \times 3600 \times 0.92} \times \int_0^{t_a} 18249.3t + 1.6155t^3 \\ &= \frac{2.668}{3.6 \times 0.95 \times 0.9 \times 3600 \times 0.92} \times (9124.6t_a^2 + 0.4039t_a^4) \\ &= \frac{2.668}{3.6 \times 0.95 \times 0.9 \times 3600 \times 0.92} \times (9124.6 \times 12^2 + 0.4039 \times 12^4) \\ &= 345.7 \text{ W} \cdot \text{h} \end{aligned}$$

方法 (2)

$dt = \frac{du_a}{2.668}$

$Q_a = \frac{1}{3.6 \times 2.668} \int_0^{u_a} \frac{P_m}{\eta_b \eta_m} du_a$



$$\begin{aligned}
 Q_a &= \frac{1}{3.6 \times 2.668} \int_0^{u_a} \frac{P_m}{\eta_b \eta_m} du_a = \frac{1}{3.6 \times 2.668} \int_0^{u_a} \frac{\frac{u_a}{3600 \times \eta_T} \left( Gf + \frac{C_D A u_a^2}{21.15} + \delta m \frac{du}{dt} \right)}{\eta_b \eta_m} du_a \\
 &= \frac{1}{3.6 \times 2.668} \times \int_0^{u_a} \frac{\frac{u_a}{3600 \times 0.92} \times \left( 17000 \times 9.8 \times 0.012 + \frac{0.6 \times 8 \times u_a^2}{21.15} + 1.29 \times 17000 \times 0.741 \right)}{0.95 \times 0.9} du_a \\
 &= \frac{1}{3.6 \times 2.668 \times 0.95 \times 0.9 \times 3600 \times 0.92} \times \int_0^{u_a} (18249.3 u_a + 0.2270 u_a^3) du_a \\
 &= \frac{1}{3.6 \times 2.668 \times 0.95 \times 0.9 \times 3600 \times 0.92} \times (9124.6 u_a^2 + 0.0567 u_a^4) \\
 &= \frac{1}{3.6 \times 2.668 \times 0.95 \times 0.9 \times 3600 \times 0.92} \times (9124.6 \times 32^2 + 0.0567 \times 32^4) \\
 &= 345.7 \text{ W} \cdot \text{h}
 \end{aligned}$$

(2分)

等加速工况电动汽车的续驶里程为:  $s_a = \frac{u_{a2}^2 - u_{a1}^2}{25.92 \frac{du}{dt}} = \frac{32^2}{25.92 \times 0.741} = 53.31 \text{ m}$  (1分)

等减速工况

减速度为  $\frac{du}{dt} = \frac{1}{3.6} \frac{u_{a2} - u_{a3}}{t_d} = \frac{32}{3.6 \times 11} = 0.808 \text{ m/s}$

$dt = \frac{du_a}{2.909}$

等减速工况所消耗的电能为

$$\begin{aligned}
 Q_a &= \frac{1}{3.6 \times 2.909} \int_0^{u_a} P_m \eta_b \eta_m du_a = \frac{1}{3.6 \times 2.909} \int_0^{u_a} \frac{\varphi \eta_b \eta_m u_a}{3600 \times \eta_T} \left( \delta m \frac{du}{dt} - Gf - \frac{C_D A u_a^2}{21.15} \right) du_a \\
 &= \frac{1}{3.6 \times 2.909} \times \int_0^{u_a} \frac{0.5 \times 0.95 \times 0.9 u_a}{3600 \times 0.92} \times \left( 1.29 \times 17000 \times 0.808 - 17000 \times 9.8 \times 0.012 - \frac{0.6 \times 8 \times u_a^2}{21.15} \right) du_a \\
 &= \frac{0.5 \times 0.95 \times 0.9}{3.6 \times 2.909 \times 3600 \times 0.92} \times \int_0^{u_a} (15720.2 u_a - 0.2270 u_a^3) du_a \\
 &= \frac{0.5 \times 0.95 \times 0.9}{3.6 \times 2.909 \times 3600 \times 0.92} \times (7860.1 u_a^2 - 0.0567 u_a^4) \\
 &= \frac{0.5 \times 0.95 \times 0.9}{3.6 \times 2.909 \times 3600 \times 0.92} \times (7860.1 \times 32^2 - 0.0567 \times 32^4) \\
 &= 98.47 \text{ W} \cdot \text{h}
 \end{aligned}$$

(2分)

等减速工况电动汽车的续驶里程为:  $s_d = \frac{u_{a2}^2 - u_{a3}^2}{25.92 \frac{du}{dt}} = \frac{32^2}{25.92 \times 0.808} = 48.89 \text{ m}$  (1分)

32km/h 等速工况电机需提供的功率为

$$P_m = \frac{u_a}{3600 \eta_T} \left( Gf + \frac{C_D A u_a^2}{21.15} \right) = \frac{32}{3600 \times 0.92} \times \left( 17000 \times 9.8 \times 0.012 + \frac{0.6 \times 8 \times 32^2}{21.15} \right) = 21.56 \text{ kW}$$

等速工况所消耗的电能为  $Q_t = \frac{1}{3.6} \int_0^{t_i} \frac{P_m}{\eta_b \eta_m} dt = \frac{1}{3.6} \int_0^{t_i} \frac{21.56}{0.95 \times 0.9} dt = 7.005 \times 24 = 168.1 \text{ W} \cdot \text{h}$  (1分)

分)

等速工况电动汽车的续驶里程为:  $s_t = \frac{u_a}{3600} \times t_t = \frac{32}{3600} \times 24 = 0.21333 \text{ km} = 213.33 \text{ m}$  (1分)

单个循环工况消耗的电能为

$Q_{z0} = Q_t + Q_a - Q_d = 168.1 + 345.7 - 98.47 = 415.33 \text{ W} \cdot \text{h}$  (1分)

单个循环工况消耗的续驶里程为

$s_0 = s_t + s_a + s_d = 213.33 + 53.31 + 48.89 = 315.53 \text{ m}$  (1分)

电池容量为 250kWh 的续驶里程为  $s_z = s_0 \frac{Q_z}{Q_{z0}} = 315.53 \times \frac{250 \times 1000}{415.33} = 189.93 \text{ km}$  (1分)

#### 第4章

1、(15分) 名词解释：车轮滑动率、制动力系数、滑动附着系数、峰值附着系数、侧向力系数、同步附着系数、利用附着系数。

答：1) 车轮滑动率：车轮运动时车轮滑动速度与车轮中心速度的比值，即

$$s = \frac{u_w - r_0 \omega_w}{u_w} \times 100\%;$$

2) 制动力系数：地面制动力与垂直载荷之比为制动力系数，即  $\phi_0 = \frac{F_{xb}}{F_z}$ ；

3) 滑动附着系数： $s = 100\%$  的制动力系数称为滑动附着系数  $\phi_s$ ；

4) 峰值附着系数：制动力系数的最大值称为峰值附着系数  $\phi_p$ ，通常在  $s = 15\% - 20\%$  时出现；

5) 侧向力系数：侧向力(地面)与垂直载荷之比。即  $\phi_l = \frac{F_y}{F_z}$ ；

6) 同步附着系数： $\beta$  线与 I 曲线交点处的附着系数，称为同步附着系数  $\phi_0$ ， $\phi_0 = \frac{L\beta - b}{h_g}$ ；

7) 利用附着系数：汽车以一定的减速度制动时，除去制动强度  $z = \phi_0$  以外，不发生车轮抱死所要求的(最小)路面附着系数称为利用附着系数。

(1-6 每个 2 分，7 题 3 分，共 15 分)

2、(10分) 汽车空载和满载是否具有相同的制动性？具体说明原因。

答：1) 制动效能：制动减速度的增长速度有区别，空载时制动减速度增长快；最大制动减速度空载和满载时一样。

制动距离：空载时制动距离短些，根据公式  $s = \frac{1}{3.6} \left( \tau_2' + \frac{\tau_2''}{2} \right) u_{a0} + \frac{u_{a0}^2}{25.92 a_{b\max}}$

式中空载和满载时  $\tau_2'$ 、 $u_{a0}$ 、 $a_{b\max}$  均相同，但由于空载时制动减速度增长快， $\tau_2''$  较小，因此制动距离短。(4分)

2) 制动效能的恒定性：根据制动效能的分析，为获得相同的制动效能，满载时制动器工作时间更长，因此热衰退更明显，制动效能的恒定性较差。(2分)

3) 制动时的方向稳定性：因为空载、满载时汽车质心位置的变化，造成同步附着系数  $\phi_0$  的不同，通常满载时  $\phi_0$  较大，因此前轮先抱死机率较大，易失去转向能力；而空载时  $\phi_0$  较小，因此后轮先抱死机率较大，在车速较高时易出现后轴侧滑甩尾。(4分)

2、(15分) 为什么汽车在光滑路面上高速制动时，后轮抱死是一种危险工况？对于轻型货车，满载与空载两种情况下，哪一种更容易出现后轮抱死现象？为什么？

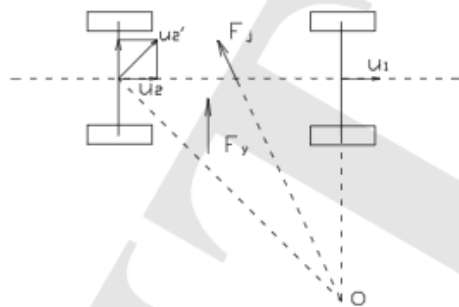
答：如图为汽车后轮先于前轮制动抱死时的运动情况：

1) 因后轮抱死，后轴受偶然侧向力  $F_y$  作用将发生侧滑，后轴中点的前进速度变为  $u_2'$ ，前轴因未发生抱死，前进速度方向仍然为汽车纵轴方向  $u_1$ 。

2) 此时汽车将发生类似转弯的运动，其瞬时回转中心为速度  $u_2'$  和  $u_1$  两垂线的交点 O；汽车作圆周运动时产生了作用于汽车质心的惯性力  $F_j$ 。

3) 显然  $F_j$  的方向与后轴发生侧滑的方向一致，且由于车速高，惯性力较大，于是惯性力加

后轴侧滑；后轴侧滑有加剧惯性力，汽车将急剧转动，是不稳定、非常危险的工况。



(10分)

对于轻型货车，空载时  $\varphi_0$  较小，因此通常  $\varphi_{0\text{空载}} < \varphi$ ，后轮先抱死机率较大，在车速较高时易出现后轴侧滑甩尾。(5分)

4、(15分) 造成制动跑偏的主要原因是什么？为什么两前轮制动力不相等对制动跑偏的影响更大？

答：造成制动跑偏的主要原因有：1) 汽车左、右车轮制动力不相等，特别是前轴左、右车轮（转向轮）制动器制动力不相等。2) 制动时悬架导向杆系与转向系拉杆在运动学上不协调（互相干涉）。(6分)

对于两前轮制动力不相等，假设  $F_{x1l} > F_{x1r}$ ，一方面， $F_{x1l}$  绕主销的力矩大于  $F_{x1r}$  绕主销的力矩。虽然转向盘不动，但由于转向系各处的间隙及零部件的弹性变形，转向轮仍产生一向左转动的角度而使汽车有轻微的转弯行驶，即跑偏。(4分) 同时由于主销后倾，使由于两侧制动力不等产生的  $F_{y1}$  对转向轮又产生向制动力较大一侧的偏转力矩，增大了跑偏的角度。(3分) 而两后轮制动力不相等无以上增大作用，因此两前轮制动力不相等对制动跑偏的影响更大。(2分)

5、(20分) 某轿车，轴距  $L=2.6\text{m}$ ，质心高度  $h_g=0.58\text{m}$ ，满载质量  $m=1460\text{kg}$ ，静态时前轮承载比例为 62%。该车采用常规制动系统，制动力分配系数  $\beta_1=0.82$ 。该车在附着系数  $\varphi=0.7$  的路面上制动 ( $g=10\text{m/s}^2$ )。

- (1) 计算在前轮刚抱死时前、后轮能提供多大的制动力；
- (2) 计算(1)中制动工况的制动效率；
- (3) 计算前轮能提供的最大制动力；
- (4) 若该车制动力分配系数调整为  $\beta_2=0.72$ ，计算后轮能提供的最大制动力。

答：(1)  $\varphi_{01} = \frac{L\beta_1 - b}{h_g} = \frac{2.6 \times 0.82 - (2.6 \times 0.62)}{0.58} = 0.897$  (2分)

$\varphi=0.7 < \varphi_{01}=0.897$ ，前轮先抱死。(1分)

此时  $E_f = \frac{z}{\varphi_f} = \frac{b}{L\beta - \varphi_f h_g} = \frac{2.6 \times 0.62}{2.6 \times 0.82 - 0.7 \times 0.58} = 0.934$

前轮刚抱死时的制动强度  $z = E_f \varphi_f = 0.934 \times 0.7 = 0.654$  (3分)

前轮地面制动力为

$$F_{xb1} = F_{z1}\varphi = \frac{G}{L}(b + zh_g)\varphi = \frac{1460 \times 10}{2.6}(2.6 \times 0.62 + 0.654 \times 0.58) \times 0.7 = 7827N$$

$$\text{后轮地面制动力为 } F_{xb2} = Gz - F_{xb1} = 1460 \times 10 \times 0.654 - 7827 = 1721N \quad (4 \text{ 分})$$

(2) 前轮先抱死,

$$E_f = \frac{z}{\varphi_f} = \frac{b}{L\beta - \varphi_f h_g} = \frac{2.6 \times 0.62}{2.6 \times 0.82 - 0.7 \times 0.58} = 0.934 \quad (3 \text{ 分})$$

(3) 前轮地面制动力最大值出现在前、后轮都抱死时。

$$\text{此时 } F_{xb1} = F_{z1}\varphi = \frac{G}{L}(b + \varphi h_g)\varphi = \frac{1460 \times 10}{2.6}(2.6 \times 0.62 + 0.7 \times 0.58) \times 0.7 = 7932N$$

(3 分)

$$(4) \varphi_{02} = \frac{L\beta_2 - b}{h_g} = \frac{2.6 \times 0.72 - (2.6 \times 0.62)}{0.58} = 0.448, \quad \varphi = 0.7 > \varphi_{02} = 0.448, \text{ 故后轮先}$$

抱死, 后轮抱死后, 前、后轮地面制动力按  $\varphi = 0.7$  的  $r$  线变化,  $F_{xb2}$  会减小, 因此后轮地面制动力最大值出现在后轮刚抱死时。(2 分)

$$\text{此时制动强度为 } z = E_r \varphi_r = \frac{a}{L(1 - \beta_2) + \varphi_r h_g} \varphi_r = \frac{2.6 \times 0.38}{2.6(1 - 0.72) + 0.7 \times 0.58} \times 0.7 = 0.61$$

后轮地面制动力为

$$F_{xb2} = F_{z2}\varphi = \frac{G}{L}(a - zh_g)\varphi = \frac{1460 \times 10}{2.6}(2.6 \times 0.38 - 0.61 \times 0.58) \times 0.7 = 2493N \quad (2 \text{ 分})$$

6、(25 分) 一轿车结构参数同题 1.8 中给出的数据。轿车装有单回路制动系, 其制动力分配系数  $\beta = 0.60$ 。试求:

- 1) 同步附着系数。
- 2) 在  $\varphi = 0.75$  的路面上的制动效率。
- 3) 汽车此时能到达的最大制动减速度 (指无任何车轮抱死)。
- 4) 若将该车改为双回路制动系统 (只改变制动的传动系, 见习题图 3), 而制动器总制动力与总泵输出管路压力之比称为制动系增益, 并令原车单管路系统的增益为  $G'$ 。确定习题图 3 中各种双回路系统以及在一个回路失效时的制动系增益。
- 5) 计算: 在  $\varphi = 0.7$  的路面上, 上述双回路系统在一个回路失效时的制动效率及其能达到的最大制动减速度。
- 6) 比较各种回路系统的优缺点。

$$\text{答: } 1) \varphi_0 = \frac{L\beta - b}{h_g} = \frac{2.7 \times 0.6 - 1.25}{0.63} = 0.587 \quad (2 \text{ 分})$$

2)  $\varphi = 0.75 > \varphi_0 = 0.587$ , 故后轮先抱死,

$$\text{此时制动效率为 } E_r = \frac{a/L}{(1 - \beta) + \varphi_r h_g/L} = \frac{1.45/2.7}{(1 - 0.6) + 0.75 \times 0.63/2.7} = 0.934 \quad (3 \text{ 分})$$

$$3) \text{ 此时的制动减速度为: } \frac{du}{dt} = E_r \varphi g = 0.934 \times 0.75 \times 9.8 = 6.865 \text{ m/s}^2 \quad (2 \text{ 分})$$

4) 各种情况下的制动系增益如下表所示: (3 分)

制动系增益	a)	b)	c)
双回路系统	$G'$	$G'$	$G'$
1 回路失效时	$0.4 G'$	$0.5 G'$	$0.5 G'$
2 回路失效时	$0.6 G'$	$0.5 G'$	$0.5 G'$



5) a) 情况:

1 回路失效时,  $\beta=0$ , 后轮会抱死, 抱死瞬间的制动效率为

$$E_r = \frac{a/L}{(1-\beta) + \varphi_r h_g / L} = \frac{1.45/2.7}{(1-0) + 0.7 \times 0.63/2.7} = 0.462$$

$$\frac{du}{dt} = E_r \varphi g = 0.462 \times 0.7 \times 9.8 = 3.169 \text{ m/s}^2 \quad (3 \text{ 分})$$

2 回路失效时,  $\beta=1$ , 前轮会抱死, 抱死瞬间的制动效率为

$$E_f = \frac{b/L}{\beta - \varphi_f h_g / L} = \frac{1.25/2.7}{1 - 0.7 \times 0.63/2.7} = 0.553$$

$$\frac{du}{dt} = E_f \varphi g = 0.553 \times 0.7 \times 9.8 = 3.796 \text{ m/s}^2 \quad (3 \text{ 分})$$

b) 情况

当一个回路失效

$$\frac{F_{\mu 1}}{F_{\mu 2}} = \frac{b + 0.5 \varphi_0 h_g}{a - 0.5 \varphi_0 h_g} \quad \text{且} \quad \frac{F_{\mu 1}}{F_{\mu 2}} = \frac{\beta}{1 - \beta}$$

$$\varphi_0 = \frac{2(L\beta - b)}{h_g} = 2 \times 0.587 = 1.174$$

在  $\varphi=0.7$  的路面上的制动,  $\varphi < \varphi_0$ , 前轮先抱死。

设前轮先抱死时的制动强度为  $z$ ,  $F_{x21} = 0.5 F_{z1} \varphi$ ,  $F_{x21} = \beta G z$ ,  $F_{x21} = \frac{G}{L}(b + z h_g)$

$$\text{求得 } z = \frac{\varphi b}{2L\beta - \varphi h_g}$$

$$E = E_f = \frac{z}{\varphi} = \frac{b}{2L\beta - \varphi h_g} = \frac{1.25}{2 \times 2.7 \times 0.6 - 0.7 \times 0.63} = 0.447$$

$$\frac{du}{dt} = E_f \varphi g = 0.447 \times 0.7 \times 9.8 = 3.063 \text{ m/s}^2 \quad (4 \text{ 分})$$

c) 情况: 同 b) 情况。 (1 分)

6) a) 情况: 优点: 2 回路失效时的最大制动减速度较大, 制动效能较优; 同轴左、右轮制动力相等, 不易跑偏。

缺点: 1 回路失效, 后轴先抱死易侧滑甩尾; 2 回路失效时前轮先抱死失去转向能力。 (2 分)

b) 情况: 优点: 一个回路失效时,  $\beta$  不变, 制动稳定性相对较好;

缺点: 一个回路失效时, 实现左右侧制动器制动力相等较困难, 有出现制动跑偏的危险。

c) 情况: 缺点: 一个回路失效时, 左、右侧车轮制动力严重不等, 易出现严重跑偏。 (2 分)

## 2022 年作业题参考解答

### 第 5 章

1、(10 分) 一辆轿车(每个)前轮胎的侧偏刚度为-50176N / rad、外倾刚度为-7665N / rad。若轿车向左转弯, 将使两前轮均产生正的外倾角, 其大小为  $4^\circ$ 。设侧偏刚度与外倾刚度均不受左、右轮载荷转移的影响, 试求由外倾角引起的前轮侧偏角。

答: 由题意:  $F_y = k\alpha + k_\gamma\gamma = C$ , 原外倾角  $\gamma = 0^\circ$ , 现外倾角  $\gamma = 4^\circ$

故由外倾角变化引起的前轮侧偏角:

$$\alpha = -k_\gamma\gamma/k = -7665 \times 4 / -50176 = -0.611^\circ$$

2、(15 分) 6450N 轻型客车在试验中发现过多转向和中性转向现象, 工程师们在前悬架上加装横向稳定杆以提高前悬架的侧倾角刚度, 结果汽车的转向特性变为不足转向。试分析其理论依据(要求有必要的公式和曲线)。

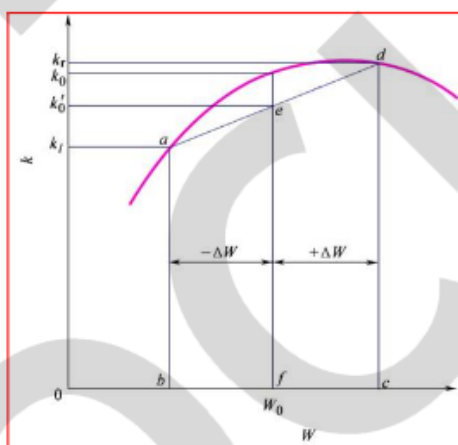
答: 该车前悬架加装横向稳定杆后, 前悬架侧倾角刚度  $K_{\phi r1}$  增大, 整车侧倾角刚度增大, 车厢侧倾角  $\phi_r$  减小;

在分析侧倾时垂直载荷在左、右车轮上的重新分配时, 可以得到:

$$\Delta F_{z1} = (F_{zy} \frac{b_z}{L} h_1 + K_{\phi r1} \Phi_r + F_{u1y} h_{u1}) / B_1, \quad \Delta F_{z2} = (F_{zy} \frac{a_z}{L} h_2 + K_{\phi r2} \Phi_r + F_{u2y} h_{u2}) / B_2$$

当前悬架增加横向稳定杆后汽车前悬架的侧倾角刚度增大, 后悬架侧倾角刚度不变, 前悬架作用于车厢的恢复力矩增加(总侧倾力矩不变), 而后悬架作用于车厢的恢复力矩减小, 所以汽车前轴左、右车轮载荷变化量较后轴大。

如图所示, 侧倾时垂直载荷在左、右车轮重新分配, 垂直载荷变动量越大, 左、右车轮侧偏刚度之和越小, 侧偏角越大。因此前悬架加装横向稳定杆后, 汽车前轴左、右车轮载荷变化量大于后轴, 汽车不足转向量增大。



3、(15 分) 汽车的稳态响应有哪几种类型? 表征稳态响应的具体参数有哪些? 它们彼此之间的关系如何?

答: 汽车的稳态响应有三种类型, 即中性转向、不足转向和过多转向。

表征稳态响应的参数有稳定性因数  $K$ , 前、后轮的侧偏角绝对值之差  $(\alpha_1 - \alpha_2)$ , 转向半径的比  $R/R_0$ , 静态储备系数  $S.M.$  等。

它们之间的彼此关系为:

$$\alpha_1 - \alpha_2 = K a_y L \quad (a_y \text{ 为侧向加速度的绝对值});$$

$$\frac{R}{R_0} = 1 + Ku^2;$$

$$R = \frac{L}{\delta - (\alpha_1 - \alpha_2)} \Rightarrow R/R_0 = \frac{\delta}{\delta - (\alpha_1 - \alpha_2)};$$

$$S.M. = \frac{k_2}{k_1 + k_2} - \frac{a}{L} = \left| \frac{k_1 k_2}{k_1 + k_2} \right| \frac{L}{m} K \quad (k_1, k_2 \text{ 分别为汽车前、后轮的侧偏刚度, } a \text{ 为汽车}$$

质心到前轴的距离,  $L$  为前、后轴之间的距离)。

4、(10 分) 某种汽车的质心位置、轴距和前后轮胎的型号已定。按照二自由度操纵稳定性模型, 其稳态转向特性为过多转向, 试找出五种改善其特性的方法。

答: 1) 减小前轮气压、增大后轮气压;

2) 在汽车前悬架加装横向稳定杆;

3) 增加主销内倾角;

4) 增大主销后倾角;

5) 前悬采用双横臂式等类型悬架 (除单横臂和非独立悬架外), 后悬采用非独立悬架;

6) 使汽车前束具有在压缩行程减小, 复原行程增大的特性;

7) 使后悬架的侧倾转向具有趋于不足转向的特性;

8) 使用合适的变形转向悬架类型, 如后轮随动转向;

9) 四驱调节;

10) 横摆力偶矩调节。

5、(10 分) 汽车空载和满载是否具有相同的操纵稳定性?

答: 不具有相同的操纵稳定。因为汽车空载和满载时汽车的总质量、质心位置会发生变化, 这些将会影响汽车的稳定性因数、轮胎侧偏刚度、汽车侧倾刚度等操纵稳定性参数。

根据稳定性因数  $K$  的计算式, 可知:

1) 若满载和空载时质心位置未发生变化, 则由于  $m$  不同, 空载时的汽车  $m$  小于满载时的  $m$ , 满载时的  $K$  更大, 操纵稳定性较好;

2) 若满载相比空载时质心位置后移, 即  $b$  减小、 $a$  增大, 造成稳定性因数  $K$  减小, 甚至为负值, 有可能出现过多转向情形, 则操纵稳定性变差。

由于满载时后轴载荷增大, 考虑侧倾时, 后轴垂直载荷的变动量也会加大, 汽车不足转向量减小。

6、(20 分) 汽车以 22m/s 的速度在半径为 100m 的圆圈内匀速行驶, 按二自由度模型考虑说明该汽车的稳态转向特性, 并计算维持汽车在轨道上行驶所必需的前轮转角和后轮侧偏角。

已知: 汽车的总质量  $m=1300\text{kg}$ , 质心距前轮中心距离  $a=1.2\text{m}$ , 质心距后轮中心  $b=1.3\text{m}$ , 前轴总侧偏刚度  $k_1=55000\text{N/rad}$ , 后轴总侧偏刚度  $k_2=60000\text{N/rad}$ 。

答: 按二自由度模型考虑:

$$K = \frac{m}{L^2} \left( \frac{b}{k_1} - \frac{a}{k_2} \right) = \frac{1300}{2.5^2} \left( \frac{1.3}{55000} - \frac{1.2}{60000} \right) = 7.56 \times 10^{-4} \text{ s}^2 / \text{m}^2, \quad (5 \text{ 分})$$

$K > 0$ , 故该车稳态转向特性为不足转向。(3 分)

$$\delta = \frac{L}{R} + LK a_y = \frac{L}{R} + LK \frac{u^2}{R} = \frac{2.5}{100} + 2.5 \times 7.56 \times 10^{-4} \times \frac{22^2}{100} = 0.0341 \text{ rad} = 1.96^\circ \quad (6 \text{ 分})$$

$$F_{Y2} = \frac{a}{L} F_y = \frac{a}{L} m \frac{u^2}{R} = \frac{1.2}{2.5} \times 1300 \times \frac{22^2}{100} = 3020.16 \text{ N} \quad (4 \text{ 分})$$

$$\text{后轮侧偏角的绝对值 } \alpha_2 = \frac{F_{Y2}}{|k_2|} = \frac{3020.16}{60000} = 0.05 \text{ rad} = 2.89^\circ \quad (2 \text{ 分})$$

7、(20 分) 某轿车：质量为 1100kg，轴距为 2500mm，前轴轴载质量为汽车总质量的 54%，单侧前轮侧偏刚度值为 297.3N/deg，单侧后轮侧偏刚度值为 392.7N/deg。

(1) 计算该车的稳定性因数，确定该车稳态转向特性的类型，并计算其特征车速或临界车速。

(2) 计算欲使汽车转变为中性转向特性，质心需后移的距离。

(3) 如果欲使该车前后轮互换，该车具有何种稳态转向特性？

(4) 绘制 (1)、(3) 两种情况的转向灵敏度-车速曲线。

答：(1)

$$K = \frac{m}{L^2} \left( \frac{b}{|k_1|} - \frac{a}{|k_2|} \right) = \frac{1100}{2.5^2} \left( \frac{0.54 \times 2.5}{2 \times 297.3 \times 180 / 3.14} - \frac{0.46 \times 2.5}{2 \times 392.7 \times 180 / 3.14} \right) = 2.475 \times 10^{-3} \text{ s}^2 / \text{m}^2$$

$K = 2.475 \times 10^{-3} > 0$ ，故该车稳态转向特性为不足转向。

因为该车稳态转向特性为不足转向，故计算其特征车速：

$$u_{ch} = \sqrt{1/K} = \sqrt{1/2.475 \times 10^{-3}} = 20.10 \text{ m/s} = 72.36 \text{ km/h} \quad (6 \text{ 分})$$

$$(2) S.M. = \frac{a' - a}{L} = \frac{k_2}{k_1 + k_2} - \frac{a}{L} = \frac{392.7}{392.7 + 297.3} - \frac{0.46 \times 2.5}{2.5} = 0.109$$

欲使汽车转变为中性转向特性，质心需后移的距离为： $S.M. \cdot L = 0.109 \times 2.5 = 0.273 \text{ m}$ 。

(4 分)

(3) 如果欲使该车前后轮互换，则

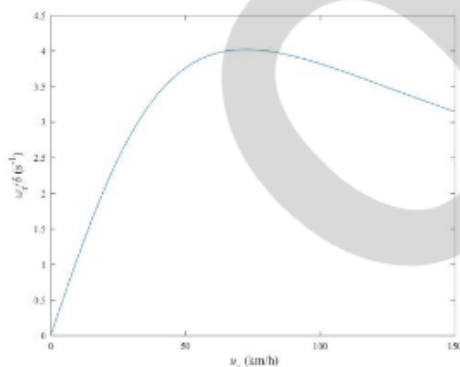
$$K = \frac{m}{L^2} \left( \frac{b}{|k_1|} - \frac{a}{|k_2|} \right) = \frac{1100}{2.5^2} \left( \frac{0.54 \times 2.5}{2 \times 392.7 \times 180 / 3.14} - \frac{0.46 \times 2.5}{2 \times 297.3 \times 180 / 3.14} \right) = -6.61 \times 10^{-4} \text{ s}^2 / \text{m}^2$$

$K = -6.61 \times 10^{-4} < 0$ ，故该车稳态转向特性为过多转向。

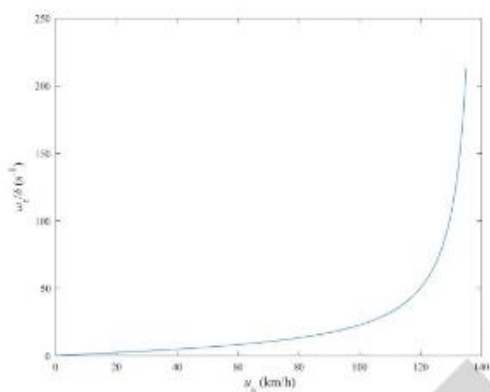
$$u_{cr} = \sqrt{1/|K|} = \sqrt{1/6.61 \times 10^{-4}} = 38.895 \text{ m/s} = 140.0 \text{ km/h} \quad (4 \text{ 分})$$

$$(4) \left. \frac{\omega_r}{\delta} \right|_s = \frac{u/L}{1 + Ku^2}$$

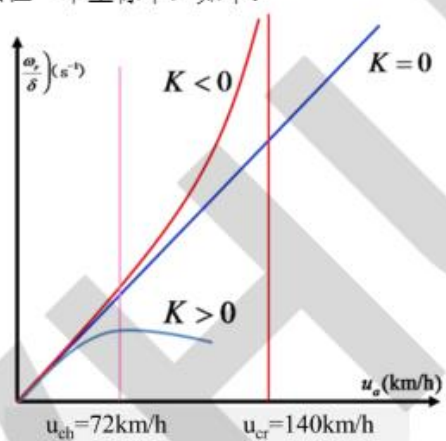
所以第 (1) 题情况的转向灵敏度-车速曲线为



第 (3) 题情况的转向灵敏度-车速曲线为



或画在一个坐标中，如下：



(6 分)



## 2022 年作业题参考解答

### 第 6 章

1、(10 分)《人体承受全身振动的评价指南》规定的人体对振动反应的三个感觉界限分别是哪些？各是何含义？关系如何？

答：《人体承受全身振动的评价指南》规定的人体对振动反应的三个感觉界限分别是暴露极限，疲劳-工效降低界限和舒适降低界限。各自含义如下：

- 1) 暴露极限：当人体承受的振动强度在这个极限之内，将保持健康或安全。
- 2) 疲劳-工效降低界限：与保持工作效能有关，当驾驶员承受的振动在此界限内时，能准确灵敏地反应，正常地进行驾驶。
- 3) 舒适降低界限：此界限与保持舒适有关，在这个界限之内，人体对所暴露的振动环境主观感觉良好，能顺利完成吃、读、写等动作。

暴露极限的值为疲劳-工效降低界限的 2 倍（在双对数坐标中上升 6dB）；

舒适降低界限为疲劳-工效降低界限的 1/3.15（在双对数坐标中下降 10dB）。

2、(10 分)人体对振动加速度反应主要取决于那几个因素？在不同方向人体对振动最敏感的频率范围分别是多少？

答：机械振动对人体的影响，既取决于振动的频率、强度、振动作用方向和持续（暴露）时间，也取决于人的心理、生理状态，不同心理和身体素质的人，对振动敏感程度有很大差异。人最敏感的频率范围，对于垂直振动是 4~12.5Hz，在 4~8Hz 频率范围，人的内脏器官产生共振；8~12.5Hz 频率范围，对人的脊椎系统影响很大。对于水平振动是 0.5~2Hz。大约在 3Hz 以下，人体对水平振动比对垂直振动更敏感。

3、(10 分)说明用试验测定汽车车身部分固有频率和阻尼比的原理及方法？

答：试验时将汽车前轮、后轮分别从一定高度抛下，记录车身质量的衰减振动曲线如图。

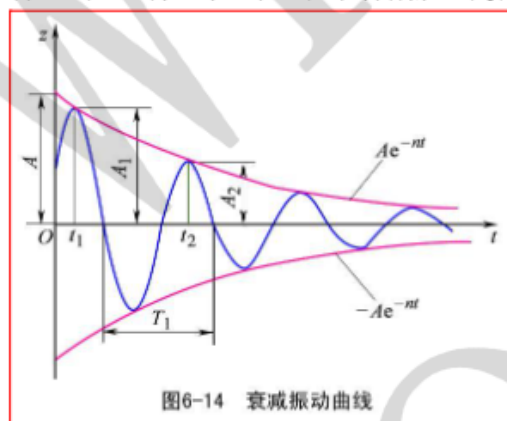


图6-14 衰减振动曲线

由图上曲线可得到车身质量振动周期  $T$ ，按下式计算出车身部分固有频率：

$$f_0 = \omega_0 / 2\pi = 1/T$$

由图上曲线可得到车身质量部分的相邻振幅比，并按下式计算出阻尼比。

$$\zeta = \frac{1}{\sqrt{1 + 4\pi^2 / \ln^2 d}}, \quad d = \frac{A_1}{A_2}$$

4、(10 分) 设车身与车轮二自由度汽车模型，其车身部分固有频率  $f_0 = 2\text{Hz}$ 。它行驶在波长  $\lambda = 5\text{m}$  的水泥接缝路上，求引起车身部分共振时的车速  $u_a(\text{km/h})$ 。该汽车车轮部分的固有频率  $f_t = 10\text{Hz}$ ，在砂石路上常用车速为  $30\text{km/h}$ 。问由于车轮部分共振时，车轮对路面作用的动载所形成的搓板路的波长  $\lambda = ?$

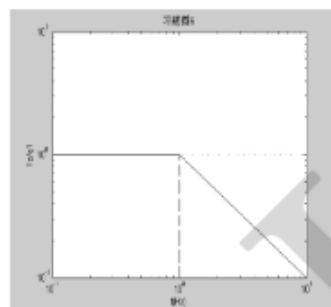
解：引起车身部分共振时的车速为：

$$u_a = \lambda f_0 = 5 \times 2 = 10\text{m/s} = 36\text{km/h}$$

车轮对路面作用的动载所形成的搓板路的波长为：

$$\lambda = \frac{u_{a1}}{f_t} = \frac{30}{3.600 \times 10} = 0.833\text{m}$$

5、(20 分) 设车身单质量系统的幅频  $|z/q|$  用双对数坐标表示时如习题图 6 所示。路上输入谱与题 6.2 相同。求车身加速度的谱密度  $G_z(f)$ ，画出其谱图，并计算  $0.1 \sim 10\text{Hz}$  频率范围车身加速度的均方根值  $\sigma_z$ 。



解：

1)  $G_q(f) = (2\pi)^2 G_q(n_0) n_0^2 u = 4\pi^2 \times 2.56 \times 10^{-4} \times 0.01 \times 20 = 2.02 \times 10^{-3} (\text{m}^2/\text{s})$  (用路面不平度的位移谱、加速度谱作为输入均可)

$$G_z(f) = \left| \frac{\ddot{z}}{\dot{q}} \right|^2 G_q(f) = \omega^2 \left| \frac{z}{q} \right|^2 G_q(f)$$

$$\therefore G_z(f) = (2\pi f)^2 \left| \frac{z}{q} \right|^2 \cdot 2.02 \times 10^{-3} = 7.97 \times 10^{-2} \left| \frac{z}{q} \right|^2 f^2$$

2)

$$\left| \frac{z}{q} \right| = 1, (f = 0.1 \sim 1); \left| \frac{z}{q} \right| = \frac{1}{f}, (f = 1 \sim 10)$$

$$\therefore f = 0.1 \sim 1 \text{ 时}, G_z(f) = 7.97 \times 10^{-2} f^2;$$

$$f = 1 \sim 10 \text{ 时}, G_z(f) = 7.97 \times 10^{-2} (\text{m}^2/\text{s}^3)$$

得到车身加速度密度谱图如下：

