2016年全国高中数学联合竞赛一试（A卷）
参考答案及评分标准

说明：

1. 评阅试卷时，请依据本评分标准. 填空题只设 8 分和 0 分两档；其他各题的评阅，请严格按照本评分标准的评分档次给分，不要增加其他中间档次.

2. 如果考生的解答方法和本解答不同，只要思路合理、步骤正确，在评卷时可参考本评分标准适当划分档次评分，解答题中第 9 小题 4 分为一个档次，第 10、11 小题 5 分为一个档次，不要增加其他中间档次.

一、填空题：本大题共 8 小题，每小题 8 分，共 64 分.

1. 设实数 a 满足 $a<9a^3-11a<|a|$，则 a 的取值范围是__________.

答案： $a\in\left(-\dfrac{2\sqrt{3}}{3},-\dfrac{\sqrt{10}}{3}\right)$.

解： 由 $a<|a|$ 可得 $a<0$，原不等式可变形为

$$1>\frac{9a^3-11a}{a}>\frac{|a|}{a}=-1,$$

即 $-1<9a^2-11<1$，所以 $a^2\in\left(\dfrac{10}{9},\dfrac{4}{3}\right)$. 又 $a<0$，故 $a\in\left(-\dfrac{2\sqrt{3}}{3},-\dfrac{\sqrt{10}}{3}\right)$.

2. 设复数 z, w 满足 $|z|=3$，$(z+\overline{w})(\overline{z}-w)=7+4\mathrm{i}$，其中 i 是虚数单位，$\overline{z}, \overline{w}$ 分别表示 z, w 的共轭复数，则 $(z+2\overline{w})(\overline{z}-2w)$ 的模为__________.

答案： $\sqrt{65}$.

解： 由运算性质，$7+4\mathrm{i}=(z+\overline{w})(\overline{z}-w)=|z|^2-|w|^2-(zw-\overline{zw})$，因为 $|z|^2$ 与 $|w|^2$ 为实数，$\mathrm{Re}(zw-\overline{zw})=0$，故 $|z|^2-|w|^2=7$，$zw-\overline{zw}=-4\mathrm{i}$，又 $|z|=3$，所以 $|w|^2=2$，从而

$$(z+2\overline{w})(\overline{z}-2w)=|z|^2-4|w|^2-2(zw-\overline{zw})=9-8+8\mathrm{i}=1+8\mathrm{i}.$$

因此，$(z+2\overline{w})(\overline{z}-2w)$ 的模为 $\sqrt{1^2+8^2}=\sqrt{65}$.

3. 正实数 u, v, w 均不等于 1，若 $\log_u vw+\log_v w=5$，$\log_v u+\log_w v=3$，则 $\log_w u$ 的值为__________.

答案： $\dfrac{4}{5}$.

解： 令 $\log_u v=a$，$\log_v w=b$，则

$$\log_v u=\frac{1}{a},\ \log_w v=\frac{1}{b},\ \log_u vw=\log_u v+\log_u v\cdot\log_v w=a+ab,$$

条件化为 $a+ab+b=5$，$\dfrac{1}{a}+\dfrac{1}{b}=3$，由此可得 $ab=\dfrac{5}{4}$. 因此 $\log_w u=\log_w v\cdot\log_v u=\dfrac{1}{ab}=\dfrac{4}{5}$.

4. 袋子 A 中装有 2 张 10 元纸币和 3 张 1 元纸币，袋子 B 中装有 4 张 5 元纸币和 3 张 1 元纸币. 现随机从两个袋子中各取出两张纸币，则 A 中剩下的纸币面值

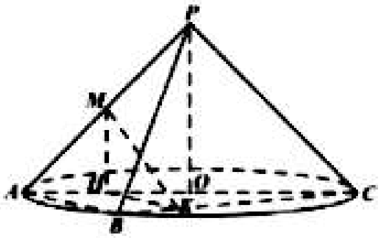
之和大于B中剩下的纸币面值之和的概率为____________.

答案：$\dfrac{9}{35}$.

解：一种取法符合要求，等价于从A中取走的两张纸币的总面值a小于从B中取走的两张纸币的总面值b，从而$a<b\le 5+5=10$．故只能从A中取走两张1元纸币，相应的取法数为$C_3^2=3$．又此时$b>a=2$，即从B中取走的两张纸币不能都是1元纸币，相应有$C_7^2-C_3^2=18$种取法．因此，所求的概率为$\dfrac{3\times18}{C_5^2\times C_7^2}=\dfrac{54}{10\times21}=\dfrac{9}{35}$.

5. 设P为一圆锥的顶点，A, B, C是其底面圆周上的三点，满足$\angle ABC=90^\circ$，M为AP的中点．若$AB=1, AC=2, AP=\sqrt{2}$，则二面角$M-BC-A$的大小为____________.

答案：$\arctan\dfrac{2}{3}$.



解：由$\angle ABC=90^\circ$知，AC为底面圆的直径．

设底面中心为O，则$PO\perp$平面ABC．易知$AO=\dfrac{1}{2}AC=1$，进而$PO=\sqrt{AP^2-AO^2}=1$.

设H为M在底面上的射影，则H为AO的中点．在底面中作$HK\perp BC$于点K，则由三垂线定理知$MK\perp BC$，从而$\angle MKH$为二面角$M-BC-A$的平面角．

因$MH=AH=\dfrac{1}{2}$，结合HK与AB平行知，$\dfrac{HK}{AB}=\dfrac{HC}{AC}=\dfrac{3}{4}$，即$HK=\dfrac{3}{4}$，这样$\tan\angle MKH=\dfrac{MH}{HK}=\dfrac{2}{3}$．故二面角$M-BC-A$的大小为$\arctan\dfrac{2}{3}$.

6. 设函数$f(x)=\sin^4\dfrac{kx}{10}+\cos^4\dfrac{kx}{10}$，其中$k$是一个正整数．若对任意实数$a$，均有$\{f(x)\,|\,a<x<a+1\}=\{f(x)\,|\,x\in\mathbf{R}\}$，则$k$的最小值为____________.

答案：16.

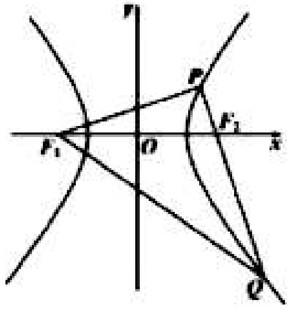
解：由条件知，
$$\begin{aligned}f(x)&=\left(\sin^2\frac{kx}{10}+\cos^2\frac{kx}{10}\right)^2-2\sin^2\frac{kx}{10}\cos^2\frac{kx}{10}\\&=1-\frac{1}{2}\sin^2\frac{kx}{5}=\frac{1}{4}\cos\frac{2kx}{5}+\frac{3}{4},\end{aligned}$$
其中当且仅当$x=\dfrac{5m\pi}{k}\,(m\in\mathbf{Z})$时，$f(x)$取到最大值．根据条件知，任意一个长为1的开区间$(a, a+1)$至少包含一个最大值点，从而$\dfrac{5\pi}{k}<1$，即$k>5\pi$.

反之，当$k>5\pi$时，任意一个开区间$(a, a+1)$均包含$f(x)$的一个完整周期，此时$\{f(x)\,|\,a<x<a+1\}=\{f(x)\,|\,x\in\mathbf{R}\}$成立．

综上可知，正整数k的最小值为$[5\pi]+1=16$.

7. 双曲线C的方程为$x^2-\frac{y^2}{3}=1$，左、右焦点分别为F_1、F_2．过点F_2作一直线与双曲线C的右半支交于点P, Q，使得$\angle F_1PQ=90^\circ$，则ΔF_1PQ的内切圆半径是__________．

答案： $\sqrt{7}-1$．



解： 由双曲线的性质知，$F_1F_2=2\times\sqrt{1+3}=4$，$PF_1-PF_2=QF_1-QF_2=2$．

因$\angle F_1PQ=90^\circ$，故$PF_1^2+PF_2^2=F_1F_2^2$，因此

$$PF_1+PF_2=\sqrt{2(PF_1^2+PF_2^2)-(PF_1-PF_2)^2}$$
$$=\sqrt{2\times4^2-2^2}=2\sqrt{7}.$$

从而直角ΔF_1PQ的内切圆半径是

$$r=\frac{1}{2}(F_1P+PQ-F_1Q)=\frac{1}{2}(PF_1+PF_2)-\frac{1}{2}(QF_1-QF_2)=\sqrt{7}-1.$$

8. 设a_1, a_2, a_3, a_4是1, 2, $\cdots$,100中的4个互不相同的数，满足

$$(a_1^2+a_2^2+a_3^2)(a_2^2+a_3^2+a_4^2)=(a_1a_2+a_2a_3+a_3a_4)^2,$$

则这样的有序数组(a_1, a_2, a_3, a_4)的个数为__________．

答案： 40．

解： 由柯西不等式知，$(a_1^2+a_2^2+a_3^2)(a_2^2+a_3^2+a_4^2)\ge(a_1a_2+a_2a_3+a_3a_4)^2$，等号成立的充分必要条件是$\frac{a_1}{a_2}=\frac{a_2}{a_3}=\frac{a_3}{a_4}$，即$a_1, a_2, a_3, a_4$成等比数列．于是问题等价于计算满足$\{a_1, a_2, a_3, a_4\}\subseteq\{1, 2, 3, \cdots, 100\}$的等比数列$a_1, a_2, a_3, a_4$的个数．设等比数列的公比$q\ne1$，且$q$为有理数．记$q=\frac{n}{m}$，其中$m, n$为互素的正整数，且$m\ne n$．

先考虑$n>m$的情况．

此时$a_4=a_1\cdot\left(\frac{n}{m}\right)^3=\frac{a_1n^3}{m^3}$，注意到$m^3, n^3$互素，故$l=\frac{a_1}{m^3}$为正整数．相应地，$a_1, a_2, a_3, a_4$分别等于$m^3l, m^2nl, mn^2l, n^3l$，它们均为正整数．这表明，对任意给定的$q=\frac{n}{m}>1$，满足条件并以$q$为公比的等比数列$a_1, a_2, a_3, a_4$的个数，即为满足不等式$n^3l<100$的正整数$l$的个数，即$\left[\frac{100}{n^3}\right]$．

由于$5^3>100$，故仅需考虑$q=2, 3, \frac{3}{2}, 4, \frac{4}{3}$这些情况，相应的等比数列的个数为$\left[\frac{100}{8}\right]+\left[\frac{100}{27}\right]+\left[\frac{100}{27}\right]+\left[\frac{100}{64}\right]+\left[\frac{100}{64}\right]=12+3+3+1+1=20$．

当$n<m$时，由对称性可知，亦有20个满足条件的等比数列a_1, a_2, a_3, a_4．

综上可知，共有40个满足条件的有序数组(a_1, a_2, a_3, a_4)．

二、解答题：本大题共 3 小题，共 56 分．解答应写出文字说明、证明过程或演算步骤．

9.（本题满分 16 分）在 ΔABC 中，已知 $\overrightarrow{AB}\cdot\overrightarrow{AC}+2\overrightarrow{BA}\cdot\overrightarrow{BC}=3\overrightarrow{CA}\cdot\overrightarrow{CB}$．求 $\sin C$ 的最大值．

解：由数量积的定义及余弦定理知，$\overrightarrow{AB}\cdot\overrightarrow{AC}=cb\cos A=\dfrac{b^2+c^2-a^2}{2}$．

同理得，$\overrightarrow{BA}\cdot\overrightarrow{BC}=\dfrac{a^2+c^2-b^2}{2}$，$\overrightarrow{CA}\cdot\overrightarrow{CB}=\dfrac{a^2+b^2-c^2}{2}$．故已知条件化为

$$b^2+c^2-a^2+2(a^2+c^2-b^2)=3(a^2+b^2-c^2),$$

即 $a^2+2b^2=3c^2$．　　　　……………………8 分

由余弦定理及基本不等式，得

$$\cos C=\frac{a^2+b^2-c^2}{2ab}=\frac{a^2+b^2-\frac{1}{3}(a^2+2b^2)}{2ab}$$

$$=\frac{a}{3b}+\frac{b}{6a}\geq 2\sqrt{\frac{a}{3b}\cdot\frac{b}{6a}}=\frac{\sqrt{2}}{3},$$

所以　　$$\sin C=\sqrt{1-\cos^2 C}\leq\frac{\sqrt{7}}{3},$$　　……………………12 分

等号成立当且仅当 $a:b:c=\sqrt{3}:\sqrt{6}:\sqrt{5}$．因此 $\sin C$ 的最大值是 $\dfrac{\sqrt{7}}{3}$．

……………………16 分

10.（本题满分 20 分）已知 $f(x)$ 是 $\mathbf{R}$ 上的奇函数，$f(1)=1$，且对任意 $x<0$，均有 $f\left(\dfrac{x}{x-1}\right)=xf(x)$．

求 $f(1)f\left(\dfrac{1}{100}\right)+f\left(\dfrac{1}{2}\right)f\left(\dfrac{1}{99}\right)+f\left(\dfrac{1}{3}\right)f\left(\dfrac{1}{98}\right)+\cdots+f\left(\dfrac{1}{50}\right)f\left(\dfrac{1}{51}\right)$ 的值．

解：设 $a_n=f\left(\dfrac{1}{n}\right)(n=1,2,3,\cdots)$，则 $a_1=f(1)=1$．

在 $f\left(\dfrac{x}{x-1}\right)=xf(x)$ 中取 $x=-\dfrac{1}{k}(k\in\mathbf{N}^*)$，注意到 $\dfrac{x}{x-1}=\dfrac{-\frac{1}{k}}{-\frac{1}{k}-1}=\dfrac{1}{k+1}$，及 $f(x)$ 为奇函数，可知

$$f\left(\frac{1}{k+1}\right)=-\frac{1}{k}\cdot f\left(-\frac{1}{k}\right)=\frac{1}{k}\cdot f\left(\frac{1}{k}\right),$$　　……………………5 分

即 $\dfrac{a_{k+1}}{a_k}=\dfrac{1}{k}$．从而 $a_n=a_1\cdot\displaystyle\prod_{k=1}^{n-1}\frac{a_{k+1}}{a_k}=\prod_{k=1}^{n-1}\frac{1}{k}=\frac{1}{(n-1)!}$．　　……………………10 分

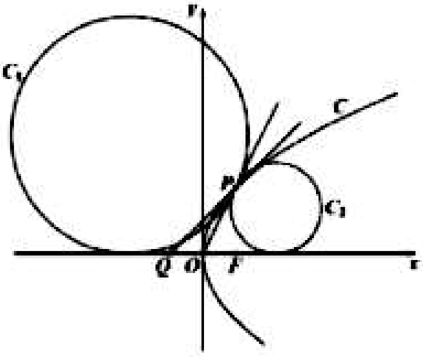
因此

$$\sum_{i=1}^{50}a_ia_{101-i}=\sum_{i=1}^{50}\frac{1}{(i-1)!\cdot(100-i)!}=\sum_{i=0}^{49}\frac{1}{i!\cdot(99-i)!}$$

$$=\frac{1}{99!}\cdot\sum_{i=0}^{49}C_{99}^{i}=\frac{1}{99!}\cdot\sum_{i=0}^{49}\frac{1}{2}\left(C_{99}^{i}+C_{99}^{99-i}\right)=\frac{1}{99!}\times\frac{1}{2}\times 2^{99}=\frac{2^{98}}{99!}.$$

………………20 分

11.（本题满分 20 分）如图所示，在平面直角坐标系 xOy 中，F 是 x 轴正半轴上的一个动点．以 F 为焦点、O 为顶点作抛物线 C．设 P 是第一象限内 C 上的一点，Q 是 x 轴负半轴上一点，使得 PQ 为 C 的切线，且 $|PQ|=2$．圆 C_1，C_2 均与直线 OP 相切于点 P，且均与 x 轴相切．求点 F 的坐标，使圆 C_1 与 C_2 的面积之和取到最小值．



解：设抛物线 C 的方程是 $y^2=2px\,(p>0)$，点 Q 的坐标为 $(-a,0)\,(a>0)$，并设 C_1，C_2 的圆心分别为 $O_1(x_1,y_1)$，$O_2(x_2,y_2)$．

设直线 PQ 的方程为 $x=my-a\,(m>0)$，将其与 C 的方程联立，消去 x 可知

$$y^2-2pmy+2pa=0.$$

因为 PQ 与 C 相切于点 P，所以上述方程的判别式为 $\Delta=4p^2m^2-4\cdot 2pa=0$，解得 $m=\sqrt{\frac{2a}{p}}$．进而可知，点 P 的坐标为 $(x_P,y_P)=(a,\sqrt{2pa})$．于是

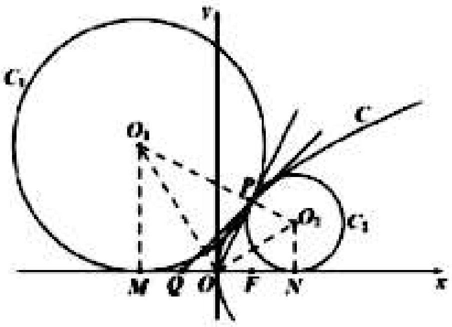
$$|PQ|=\sqrt{1+m^2}\cdot|y_P-0|=\sqrt{1+\frac{2a}{p}}\cdot\sqrt{2pa}=\sqrt{2a(p+2a)}.$$

由 $|PQ|=2$ 可得

$$4a^2+2pa=4. \qquad ①$$

………………5 分

注意到 OP 与圆 C_1，C_2 相切于点 P，所以 $OP\perp O_1O_2$．设圆 C_1，C_2 与 x 轴分别相切于点 M，N，则 OO_1，OO_2 分别是 $\angle POM$，$\angle PON$ 的平分线，故 $\angle O_1OO_2=90°$．从而由射影定理知



$$y_1y_2=O_1M\cdot O_2N=O_1P\cdot O_2P=OP^2$$
$$=x_P^2+y_P^2=a^2+2pa.$$

结合①，就有

$$y_1y_2=a^2+2pa=4-3a^2. \qquad ②$$

………………10 分

由 O_1，P，O_2 共线，可得

$$\frac{y_1-\sqrt{2pa}}{\sqrt{2pa}-y_2}=\frac{y_1-y_P}{y_P-y_2}=\frac{O_1P}{PO_2}=\frac{O_1M}{O_2N}=\frac{y_1}{y_2},$$

化简得

$$y_1+y_2=\frac{2}{\sqrt{2pa}}\cdot y_1y_2 .\qquad ③$$

……………………15 分

令 $T=y_1^2+y_2^2$，则圆 C_1, C_2 的面积之和为 πT．根据题意，仅需考虑 T 取到最小值的情况．

根据②、③可知，

$$T=(y_1+y_2)^2-2y_1y_2=\frac{4}{2pa}y_1^2y_2^2-2y_1y_2$$

$$=\frac{4}{4-4a^2}(4-3a^2)^2-2(4-3a^2)=\frac{(4-3a^2)(2-a^2)}{1-a^2}.$$

作代换 $t=1-a^2$．由于 $4t=4-4a^2=2pa>0$，所以 $t>0$．于是

$$T=\frac{(3t+1)(t+1)}{t}=3t+\frac{1}{t}-4>2\sqrt{3t\cdot\frac{1}{t}}-4=2\sqrt{3}+4.$$

上式等号成立当且仅当 $t=\frac{\sqrt{3}}{3}$，此时 $a=\sqrt{1-t}=\sqrt{1-\frac{1}{\sqrt{3}}}$．因此结合①得，

$$\frac{p}{2}=\frac{1-a^2}{a}=\frac{t}{\sqrt{1-\frac{1}{\sqrt{3}}}}=\frac{\sqrt{3}t}{\sqrt{3-\sqrt{3}}}=\frac{1}{\sqrt{3-\sqrt{3}}},$$

从而 F 的坐标为 $\left(\frac{p}{2},0\right)=\left(\frac{1}{\sqrt{3-\sqrt{3}}},0\right)$．

……………………20 分

2016年全国高中数学联合竞赛加试（A卷）
参考答案及评分标准

说明：

1. 评阅试卷时，请严格按照本评分标准的评分档次给分.

2. 如果考生的解答方法和本解答不同，只要思路合理、步骤正确，在评卷时可参考本评分标准适当划分档次评分，10分为一个档次，不要增加其他中间档次.

一、（本题满分40分） 设实数 $a_1, a_2, \cdots, a_{2016}$ 满足 $9a_i > 11a_{i+1}^2$ $(i=1,2,\cdots,2015)$.

求 $(a_1-a_2^2)\cdot(a_2-a_3^2)\cdot\cdots\cdot(a_{2015}-a_{2016}^2)\cdot(a_{2016}-a_1^2)$ 的最大值.

解 令 $P=(a_1-a_2^2)\cdot(a_2-a_3^2)\cdot\cdots\cdot(a_{2015}-a_{2016}^2)\cdot(a_{2016}-a_1^2)$.

由已知得，对 $i=1,2,\cdots,2015$，均有 $a_i-a_{i+1}^2>\frac{11}{9}a_{i+1}^2-a_{i+1}^2\ge 0$.

若 $a_{2016}-a_1^2\le 0$，则 $S\le 0$. ……………………10分

以下考虑 $a_{2016}-a_1^2>0$ 的情况. 约定 $a_{2017}=a_1$. 由平均不等式得

$$P^{\frac{1}{2016}}\le\frac{1}{2016}\sum_{i=1}^{2016}(a_i-a_{i+1}^2)=\frac{1}{2016}\left(\sum_{i=1}^{2016}a_i-\sum_{i=1}^{2016}a_{i+1}^2\right)$$

$$=\frac{1}{2016}\left(\sum_{i=1}^{2016}a_i-\sum_{i=1}^{2016}a_i^2\right)=\frac{1}{2016}\sum_{i=1}^{2016}a_i(1-a_i)$$ ……………………20分

$$\le\frac{1}{2016}\sum_{i=1}^{2016}\left(\frac{a_i+(1-a_i)}{2}\right)^2=\frac{1}{2016}\cdot 2016\cdot\frac{1}{4}=\frac{1}{4},$$

所以 $$P\le\frac{1}{4^{2016}}.$$ ……………………30分

当 $a_1=a_2=\cdots=a_{2016}=\frac{1}{2}$ 时，上述不等式等号成立，且有 $9a_i>11a_{i+1}^2$ $(i=1,2,\cdots,2015)$，此时 $P=\frac{1}{4^{2016}}$.

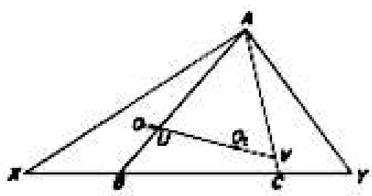
综上所述，所求最大值为 $\frac{1}{4^{2016}}$. ……………………40分

二、（本题满分40分） 如图所示，在△ABC 中，X,Y 是直线 BC 上两点（X,B,C,Y 顺次排列），使得

$$BX\cdot AC=CY\cdot AB.$$

设△ACX，△ABY 的外心分别为 O_1,O_2，直线 O_1O_2 与 AB,AC 分别交于点 U,V.

证明：△AUV 是等腰三角形.



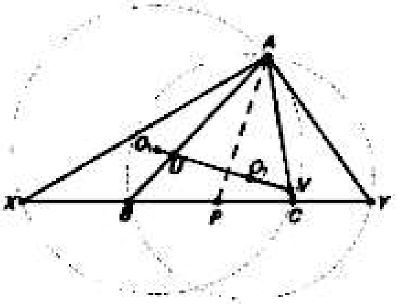
证法一 作$\angle BAC$的内角平分线交BC于点P．设三角形ACX和ABY的外接圆分别为ω_1和ω_2．由内角平分线的性质知，$\dfrac{BP}{CP}=\dfrac{AB}{AC}$．由条件可得$\dfrac{BX}{CY}=\dfrac{AB}{AC}$．从而

$$\frac{PX}{PY}=\frac{BX+BP}{CY+CP}=\frac{AB}{AC}=\frac{BP}{CP},$$

即$CP\cdot PX=BP\cdot PY$． ……………………20分

故P对圆ω_1和ω_2的幂相等，所以P在ω_1和ω_2的根轴上． ……………………30分

于是$AP\perp O_1O_2$，这表明点U,V关于直线AP对称，从而三角形AUV是等腰三角形． ……………………40分



证法二 设$\triangle ABC$的外心为O，连接OO_1, OO_2．过点O, O_1, O_2分别作直线BC的垂线，垂足分别为D, D_1, D_2．作$O_1K\perp OD$于点K．

我们证明$OO_1=OO_2$．在直角三角形OKO_1中，

$$OO_1=\frac{O_1K}{\sin\angle O_1OK}.$$

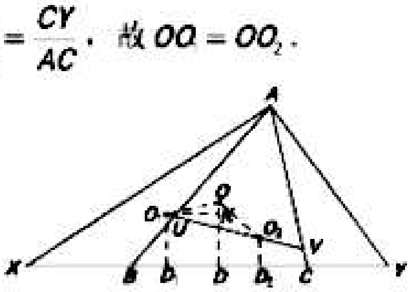
由外心的性质，$OO_1\perp AC$．又$OD\perp BC$，故$\angle O_1OK=\angle ACB$．

而D, D_1分别是BC, CX的中点，所以$DD_1=CD_1-CD=\frac{1}{2}CX-\frac{1}{2}BC=\frac{1}{2}BX$．因此

$$OO_1=\frac{O_1K}{\sin\angle O_1OK}=\frac{DD_1}{\sin\angle ACB}=\frac{\frac{1}{2}BX}{\frac{AB}{2R}}=R\cdot\frac{BX}{AB}.$$

这里R是$\triangle ABC$的外接圆半径．同理$OO_2=R\cdot\dfrac{CY}{AC}$． ……………………10分

由已知条件可得$\dfrac{BX}{AB}=\dfrac{CY}{AC}$，故$OO_1=OO_2$． ……………………20分



由于$OO_1\perp AC$，所以$\angle AVU=90^\circ-\angle OO_1O_2$．同理$\angle AUV=90^\circ-\angle OO_2O_1$．

……………………30分

又因为$OO_1=OO_2$，故$\angle OO_1O_2=\angle OO_2O_1$，从而$\angle AUV=\angle AVU$．这样$AU=AV$，即$\triangle AUV$是等腰三角形． ……………………40分

三、（本题满分 50 分） 给定空间中 10 个点，其中任意四点不在一个平面上．将某些点之间用线段相连，若得到的图形中没有三角形也没有空间四边形，试确定所连线段数目的最大值．

解 以这 10 个点为顶点，所连线段为边，得到一个 10 阶简单图 G．我们证明 G 的边数不超过 15．

设 G 的顶点为 $v_1,v_2,\cdots,v_{10}$，共有 k 条边．用 $\deg(v_i)$ 表示顶点 v_i 的度．若 $\deg(v_i)\le 3$ 对 $i=1,2,\cdots,10$ 都成立．则

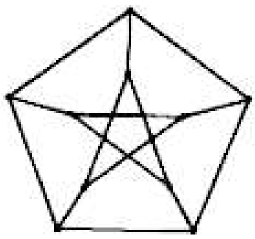
$$k=\frac{1}{2}\sum_{i=1}^{10}\deg(v_i)\le\frac{1}{2}\times 10\times 3\le 15.$$

假设存在 v_i 满足 $\deg(v_i)\ge 4$．不妨设 $\deg(v_1)=n\ge 4$，且 v_1 与 $v_2,\cdots,v_{n+1}$ 均相邻．于是 $v_2,\cdots,v_{n+1}$ 之间没有边，否则就形成三角形．所以，$v_1,v_2,\cdots,v_{n+1}$ 之间恰有 n 条边． ……………10 分

对每个 j（$n+2\le j\le 10$），v_j 至多与 $v_2,v_3,\cdots,v_{n+1}$ 中的一个顶点相邻（否则设 v_j 与 $v_s,v_t(2\le s<t\le n+1)$ 相邻，则 v_1,v_s,v_j,v_t 就对应了一个空间四边形的四个顶点，这与题设条件矛盾．），从而 $v_2,\cdots,v_{n+1}$ 与 $v_{n+2},\cdots,v_{10}$ 之间的边数至多 $10-(n+1)=9-n$ 条． ……………20 分

在 $v_{n+2},\cdots,v_{10}$ 这 $9-n$ 个顶点之间，由于没有三角形，由托兰定理，至多 $\left[\frac{(9-n)^2}{4}\right]$ 条边．因此 G 的边数

$$k\le n+(9-n)+\left[\frac{(9-n)^2}{4}\right]=9+\left[\frac{(9-n)^2}{4}\right]\le 9+\left[\frac{25}{4}\right]=15. \quad \cdots\cdots 30\text{ 分}$$



如图给出的图共有 15 条边，且满足要求．

综上所述，所求边数的最大值为 15． …………………50 分

四、（本题满分 50 分） 设 p 与 $p+2$ 均是素数，$p>3$．数列 $\{a_n\}$ 定义为 $a_1=2$，$a_n=a_{n-1}+\left\lceil\frac{pa_{n-1}}{n}\right\rceil$，$n=2,3,\cdots$．这里 $\lceil x\rceil$ 表示不小于实数 x 的最小整数．

证明：对 $n=3,4,\cdots,p-1$ 均有 $n\mid pa_{n-1}+1$ 成立．

证明 首先注意，$\{a_n\}$ 是整数数列．

对 n 用数学归纳法．当 $n=3$ 时，由条件知 $a_2=2+p$，故 $pa_2+1=(p+1)^2$．因 p 与 $p+2$ 均是素数，且 $p>3$，故必须 $3\mid p+1$．因此 $3\mid pa_2+1$，即 $n=3$ 时结论成立．

对 $3<n\le p-1$，设对 $k=3,\cdots,n-1$ 成立 $k\mid pa_{k-1}+1$，此时 $\left\lceil\frac{pa_{k-1}}{k}\right\rceil=\frac{pa_{k-1}+1}{k}$，

故

$$pa_{k-1}+1=p\left(a_{k-2}+\left\lceil\frac{pa_{k-2}}{k-1}\right\rceil\right)+1=p\left(a_{k-2}+\frac{pa_{k-2}+1}{k-1}\right)+1$$

$$=\frac{(pa_{k-2}+1)(p+k-1)}{k-1}.$$ ……………………10 分

故对 $3<n\le p-1$，有

$$pa_{n-1}+1=\frac{p+n-1}{n-1}(pa_{n-2}+1)=\frac{p+n-1}{n-1}\cdot\frac{p+n-2}{n-2}(pa_{n-3}+1)$$

$$=\cdots=\frac{p+n-1}{n-1}\cdot\frac{p+n-2}{n-2}\cdots\frac{p+3}{3}(pa_2+1),$$ ………20 分

因此

$$pa_{n-1}+1=\frac{2n(p+1)}{(p+n)(p+2)}C_{p+n}^{n}.$$

由此知（注意 C_{p+n}^{n} 是整数） $n\mid(p+n)(p+2)(pa_{n-1}+1)$. ①

……………………40 分

因 $n<p$，p 素数，故 $(n,n+p)=(n,p)=1$，又 $p+2$ 是大于 n 的素数，故 $(n,p+2)=1$，从而 n 与 $(p+n)(p+2)$ 互素，故由①知 $n\mid pa_{n-1}+1$．由数学归纳法知，本题得证． ……………………50 分