

参赛密码 _____
(由组委会填写)

全国第八届研究生数学建模竞赛

学 校	南京师范大学
参赛队号	10319011
队员姓名	1.钱兵
	2.张海龙
	3.李静波

参赛密码 _____
(由组委会填写)

全国第八届研究生数学建模竞赛



题 目 小麦蜡熟期茎秆抗倒伏的静态和动态数学模型

摘 要：

以力学理论为基础，考虑麦穗自重及风力大小、方向、作用点等因素，将茎秆状态分为静态和动态过程，分别建立了蜡熟期茎秆的静态和动态抗倒伏模型。

第一问，据 07 年较完整的数据，提出多个假设，推导出 08 年和 11 年数据中各品种的机械强度、茎秆鲜重及重心高度计算公式，结合已给倒伏指数公式，并将 07 年和 11 年数据分别按时期对各品种的倒伏指数进行统计。结果显示：各品种小麦倒伏能力排序与附件中所给的前人经验结果非常接近。

第二问，在问题一计算结果基础上，考虑茎秆外部特征之间存在多重共线性，分别建立各品种小麦、通用的茎秆外部特征对倒伏指数的逐步回归模型；针对各小麦品种，对显著影响倒伏指数的外部特征因素，具体判断它们之间的相关性大小；以外部特征为自变量，建立倒伏概率（Logistic）模型，模型检验显示准确率达 99.1%，分析得到小麦倒伏的原因是：基部第一节过于细长、茎秆的高度较高、基部第三节过细。

第三问，由于已知数据和假设的有限性，该问的理想株型结构主要考虑各节长、各节粗、穗长、各节鲜重、穗鲜重、株高六种指标。基于前二问的计算结果（倒伏指数、倒伏概率），进行 K-means 聚类分析，选择出最优小麦茎秆，最终得到相应的理想株型结构。

第四问，考虑穗重、茎秆结构，建立茎秆静态刚度模型，计算了每种小麦的抗弯刚度；增加考虑风力因素，建立了有风状态的静态受力模型，计算了每种小麦的临界折断力和抗倒伏风速；增加考虑茎秆的摆动过程，建立了有风状态的动态运动模型，计算了每种小麦的茎秆运动轨迹。

第五问，利用 07 年三种小麦的蜡熟期数据，及合理假设，计算得到问题四中模型所需参数值；进而求解得到各小麦品种的抗弯刚度、临界折断力和抗倒伏风速；结果表明抗倒伏能力为：矮抗 58>周麦 18>新麦 208；对运动模型进行仿真，得到在一定风速下茎秆摆动的运动轨迹。考虑到运动模型为非线性动力模型，利用相平面分析法，发现存在明显混沌现象，找出了可能导致混沌的相关特性参数。

第六问，总结前面五问建立的模型，将计算结果与实际情形相对应比较，验证了所建模型的物理意义；提出在建模及求解过程中发现的问题，如样本组成的不一致，指标的缺失，时间轴的不确定，不全面，力学测试太少，运动过程没有记录等，重点突出小

麦抗倒伏模型的混沌现象进一步研究方向；根据本文的研究结论列出一套测试方案，同时提出适当可行的建议。

文章最后，对文章的模型进行适当的优缺点评价及可行性分析。

关键词：小麦抗倒伏 倒伏指数 理想株型结构 抗倒伏模型 混沌现象

目 录

1	前 言	6
1.1	研究意义	6
1.2	国内外研究动态	6
1.3	问题的分析	7
1.4	基本假设	8
1.5	模型的符号说明	8
1.6	本文的架构设计	8
2	问题一解答——各品种小麦抗倒伏指数计算	10
2.1	问题一的分析	10
2.2	数据的整理	10
2.3	倒伏指数公式的推导	10
2.4	各品种小麦倒伏指数结果	14
3	问题二解答——判断倒伏指数与茎秆外部特征的关系	15
3.1	问题分析	15
3.2	倒伏指数与茎秆外部特征的相关性分析	15
3.3	判断小麦倒伏的原因	22
4	问题三解答——分析小麦理想株型结构	26
4.1	问题的分析	26
4.2	小麦茎秆抗倒伏能力的分类	26
4.3	分析各单穗重的理想株型结构	28
5	问题四解答——建立小麦茎秆抗倒伏的数学模型	32
5.1	问题的分析	32
5.2	考虑的因素	32
5.3	小麦茎秆抗倒伏模型的建立	32
6	问题五解答——小麦茎秆抗倒伏数学模型的求解	40
6.1	问题五的分析	40
6.2	数据处理	40
6.3	问题四模型的求解	41
6.4	倒伏过程的非线性动力学分析	43
7	问题六的解答——总结模型和提出建议	45
7.1	模型总结及结果分析	45
7.2	需考虑的问题及建议	45
7.3	2012 年的试验方案与数据分析方法	46
8	模型的评价	48
8.1	主要有以下优点	48
8.2	模型的可行性分析	48
8.3	模型存在的缺陷及改进建议	48
	参考文献	49
	附 录	50
	附录一 各品种茎秆外部特征相关系数	50
	附录二 矮抗 58、新麦 208 和周麦 18 三种品种蜡熟期所有样品指标值	51

附录三	2008 年计算茎秆重心 -----	52
附录四	2011 年温麦穗重计算 -----	53
附录五	动态模型仿真-----	54

1 前言

1.1 研究意义

随着小麦产量水平的进一步提高,高产与倒伏的矛盾日益突出,倒伏成为影响小麦产量的主要限制因子,“抗倒伏”是“超高产”的前提和保障。据文献报道,小麦倒伏导致减产可达 4-20%, 30%, 甚至 40%。^[1]因此,在保证小麦产量的前提下如何降低倒伏是科学家们亟待解决的重大问题。

倒伏在小麦种植上是个普遍现象,从形式上可分为“根倒”和“茎倒”,一般都发生在小麦发育后期。“根倒”主要与小麦种植区域的土壤品种与结构特性有关。“茎倒”是高产小麦倒伏的主要形式,尤其是发生时间较早的“茎倒”,往往造成大幅度的减产。“茎倒”的原因是茎秆与穗的自重和风载作用的迭加超过了小麦茎秆的承受能力。据研究,在灌浆中后期,小麦局部或大面积倒伏严重影响小麦成熟,降低千粒重,造成减产。据调查,小麦因倒伏平均每 667m² 约减产 35 kg 左右。在小麦乳熟期倒伏减产约 32.4%-36.2%,乳熟后期倒伏减产约 10.2%-26.5%,倒伏越早,程度越严重,减产幅度越大^[2]。因此,深入研究小麦品种的抗倒性,进一步提高高产品种的抗倒伏能力,对实现小麦高产、稳产、优质有着极为重要的意义。

1.2 国内外研究动态

国内外在小麦抗倒伏方面的研究已取得不少成果。在小麦抗倒伏能力与茎秆的结构方面,龚邦铎(1992)总结为茎秆应具有“绿圆干硬”的特点,“绿”是茎色发绿,若发黄发白则是光照不足的表现;“圆”是茎圆凸起,如呈扁圆形则表示茎壁薄弱;“干”是干物质多,水分较少;“硬”是手摸发硬。小麦茎秆的节间一般为 4-6 个。Reev 研究发现,品种的节间数目与抗倒性有关,节间数目少的品种其抗倒伏能力较强。高如嵩(1990)认为抗倒伏能力强的品种的茎秆基部生长姿态呈“杯状”,而易倒伏品种呈“丛状”。朱新开(2006)认为矮秆、基部节间较短、重心高度较低、穗下节间较长且株高构成指数大的植株有利于小麦抗倒伏。小麦穗下节间长度占节间总长的比例和穗下节间与穗长之和占节间总长的比例较大时,植株抗倒伏能力强(刘天华,1995; Pinthus M J, 1973)。可见,株高过高使植株的重心高度增高,受力的力臂增大,外力力矩增大,当外力力矩大于植株的抗折力矩时,即发生倒伏。基部茎粗、单位节间干重和壁厚度与倒伏性均呈显著负相关(Pinthus M J, 1973);基部第一节间长度和单茎根重均显著影响小麦品种的抗倒力(刘天华,1995),节间短、茎壁厚、茎秆和发达的根系是抗倒伏品种的基本形态,基部节间短而厚的品种抗倒伏性强(李扬汉,1979),节间长、茎壁薄的茎秆抗倒性差(马跃芳,1990)。而黄玉鸾(1988)、龚有锐(1982)、高如嵩(1990)和 Jzowski(1982)的调查结果则显示茎粗与倒伏无明显相关性;P. M. Berry(2003, 2004, 2007)的研究结果也表明,茎壁密度与抗倒性密切相关,而与直径和壁厚关系不大。

有关茎秆力学特征与倒伏之间关系的研究也有较大的进展。最早的相关研究可以追溯到 1976 年, Bashford L.L. 等人研究了机械性能对高粱倒伏的影响。白详等(1986)研究了大气增压使小麦茎秆矮化,特别是第一节间明显缩短的影响。林俊泽等(1992)指出茎秆的物理特性与倒伏的关系极为密切。王勇等(1995)也认为茎秆的抗倒伏能力是通过植株的抗弯曲能力和抗折断能力表现出来的。1999 年重庆大学生物力学实验室进行了水稻茎秆细观组织结构及其抗倒伏研究,分析了几种水稻品种的抗倒伏能力与生物力学性质(抗折断力、外径、茎壁等材料性质)的关系郭翠华等(2010)研究指出倒伏与基部第 2 茎节形态结构、节间距与力学指标弯折力、惯性矩、弹性模量、抗弯刚度、弯

曲强度均呈负相关，基部茎秆力学负荷降低，易发生倒伏。

除了上述两方面与倒伏的研究之外，国内外学者还对倒伏进行了其他方面的研究，重点有遗传特性、茎秆解剖学、茎秆生理生化成分、栽培技术措施以及对抗倒伏评价方面。由于这些研究方向和本文研究存在一定的差异，该方面的文献就不在此一一列举。

通过文献的阅读，可以了解到小麦抗倒伏的因素非常复杂，相关的研究非常多，并且从各个角度找到小麦倒伏的原因，但是都没有从根本上解决小麦的倒伏现象。而近些年通过物理力学类比研究小麦抗倒伏作为一个新角度，已经取得了一定的成果，但是因数据和实验的缺乏，该部分还处于理论研究状态。本文在现有的条件下，通过合理假设，研究小麦抗倒伏的物理力学模型，为该方面研究做一定的理论和现实贡献。

1.3 问题的分析

小麦的抗倒伏影响因素非常复杂，本文需要考虑小麦茎秆的结构特征以及物理力学特征，首先需要提出合理的假设，根据已给的抗倒伏计算公式得到各品种小麦的抗倒伏指数，再分析哪些因素影响小麦的抗倒伏指数，最后在上述研究的基础上，根据物理力学原理，考虑麦穗自重和风载作用下应力的基本规律，建立小麦抗倒伏数学模型，结合所给数据进行仿真计算。

1.3.1 抗倒伏指数的分析

在前面三问中，抗倒伏指数需要考虑茎秆鲜重、茎秆重心高度及茎秆机械强度三者的影响，但是只有 2007 年的三种小麦数据中同时包括这三个指标的数据，2011 年只有茎秆重心高度数据，其他两个指标的数据没有，而 2008 年三个指标都没有数据，因此都需要根据已有的数据提出合理的假设再重新计算得到。从而得到各个品种小麦的抗倒伏指数。

根据题目所给的抗倒伏指数计算公式可知，抗倒伏指数和茎秆鲜重、茎秆重心高度成正比，和茎秆机械强度成反比，即抗倒伏指数越大，茎秆越容易发生倒伏，反而越不容易倒伏。因此为更加便于他人理解，将这里的抗倒伏指数名称更改为倒伏指数。

1.3.2 数据的分析

由于题目附近所给的数据不是同一人整理，存在较多的差异，首先将数据中各指标单位统一，再将异常数据、少量出现的数据（如某些小麦品种的第六节茎秆数据）删除。

1.3.3 小麦倒伏原因的分析

在问题二中，倒伏原因主要从小麦茎秆的外部特征进行寻找，至于外界因素如风、雨等将不在此处考虑。并且主要是从哪些对倒伏有显著影响的茎秆外部特征中寻找，而不考虑那些对茎秆倒伏不起显著作用的外部特征。

1.3.4 理想株型结构的分析

问题三需要分析各单穗重小麦的理想株型结构，理想株型结构应该包括所有的小麦外部结构特征：株高、茎长、各节间长、各节茎外径、壁厚、茎秆自重、穗长、穗重等，但是由于这些结构特征指标的数据在附近中并不是都有，而且有些指标数据根据已有的数据无法计算得到，因此本文的理想株型结构主要考虑各节长、各节粗、穗长、各节鲜重、穗鲜重、株高六种指标。

1.3.5 茎秆抗倒伏模型考虑的因素分析

在实际生活中，小麦茎秆受到很多外在和内在因素的影响，在建立小麦茎秆抗倒伏数学模型时，为了模型的可操作性，主要考虑麦穗自重、风力、风力方向、风力作用点和小麦弯曲产生的弹性变形能五个因素，并且分析从无风情况下茎秆的静态和有风情况下茎秆的动态角度建立模型。

1.4 基本假设

本文的基本假设如下：

- 1、假设小麦每节茎秆以及穗的质量和密度均匀分布。
- 2、假设不同品种小麦间茎秆与穗的鲜重比等于它们的干重比。
- 3、假设不同品种小麦的对应节的相同鲜重晒干之后的干重是相同的，如矮抗 58 的 1g 第一节鲜重晒干之后的干重等于新麦 208 的 1g 第一节鲜重晒干之后的干重。
- 4、假设小麦茎秆晒干前后，茎秆每节的长度基本不变。
- 5、假设小麦茎秆各节保持在一条直线上，并且茎秆重心在茎秆上。
- 6、假设风一次作用在茎秆和麦穗上的作用力大小不变、保持水平方向，且作用点固定。
- 7、在外力作用下茎秆发生弹性变形，假设外力做的功全部转化成茎秆的应变能

1.5 模型的符号说明

符号	符号说明
CLI	茎秆倒伏指数
FW	茎秆鲜重
HCG	茎秆重心高度
MS	茎秆机械强度
L	小麦的茎秆株高（包括穗长）
L_i	小麦茎秆第 i 节长
$L_{穗}$	穗长
L_{ij}	茎秆第 i 节长比上第 j 节长
m_i	小麦茎秆第 i 节鲜重
W_i	小麦茎秆第 i 节粗
W_{ij}	茎秆第 i 节粗比上第 j 节粗
G_i	共 i 节茎秆的重心高度（含穗）
$m_{穗}$	穗鲜重

1.6 本文的架构设计

第一部分：前言。主要讲述了研究小麦抗倒伏问题的研究意义，并对该问题进行了相关文献重述，除此以外，还对文章要注意的方面提出了基本假设。

第二部分：问题一解答。问题一主要根据 2007 年已知数据，得到 2008 年和 2011 年数据中各品种的机械强度、茎秆鲜重以及茎秆重心高度的计算公式，再结合已给的倒伏指数公式，计算得到各小麦品种的倒伏指数，并将 2007 年和 2011 年数据按时期对各品种的倒伏指数进行统计。

第三部分：问题二解答。首先分析茎秆外部特征之间的相关性，判断它们之间是否存在多重共线性；其次，分别建立各品种小麦和通用的倒伏指数与茎秆外部特征的逐步回归模型；再次，分各小麦品种对那些显著影响倒伏指数的外部特征因素进行的相关性

分析，判断它们的相关性大小；最后，建立倒伏情况与外部特征的 Logistic 判别模型，分析得到小麦发生倒伏的原因。

第四部分：问题三解答。首先通过倒伏指数和倒伏概率两个指标进行 K-means 聚类分析，找出理想的小麦茎秆，再分析小麦茎秆的理想株型结构。

第五部分：问题四解答。在考虑无风情况下，建立不同目标的小麦抗倒伏静态模型；在有风情况下，建立小麦抗倒伏的动态模型。

第六部分：问题五解答。主要求解问题四中建立的静态模型和动态模型并进行仿真，得到模型结果，最后结合混沌现象对小麦抗倒伏进行分析

第七部分：问题六解答。在解决完上述五问的基础上，总结和分析各题模型的结果，根据建模及求解过程中发现的问题，给相关专家提出合理的建议。

2 问题一解答

——各品种小麦抗倒伏指数计算

2.1 问题一的分析

根据文章题目所给的倒伏指数计算公式, 2011 年缺少茎秆鲜重和茎秆机械强度的数据, 2008 年缺少茎秆鲜重、茎秆重心高度和茎秆机械强度的数据。因此需要计算 20011 年和 2008 年数据中小麦品种的倒伏指数, 首先必须要得到缺失指标的数据, 再来根据倒伏指数公式计算得到各品种的倒伏指数。

在计算各品种倒伏指数时, 在 2007 年、2008 年和 2011 年数据中有同样品种的小麦数据, 因时间有限, 我们只通过一年中的数据来计算同一种品种, 并不将其他年份出现的数据再重复计算相同品种小麦的倒伏指数, 具体为: 矮抗 28、新麦 208 和周麦 18 三种品种的小麦倒伏指数通过 2007 年数据计算得到; 国信 1 号、智 9998、联丰 58 和 TM 四个品种的小麦倒伏指数通过 2008 年数据计算得到; 平安 6 号、温麦 6 号、周麦 22、郑麦 9023 和豫麦 18 五个品种的小麦倒伏指数通过 2011 年数据 1 计算得到。

2.2 数据的整理

1、根据已有的各节长、粗, 求得各相邻节的长度比、粗度比, 分别记为 L_{ij} 、 W_{ij} 。 L_{ij} 为第 i 节的长比上第 j 节的长, 同理 W_{ij} 为第 i 节的粗比上第 j 节的粗。第 i 节的鲜重记为 m_i , 第 i 节的壁厚记为 B_i , 穗鲜重记为 $m_{\text{穗}}$, L 为株高, $L_{\text{穗}}$ 为穗长。

2、在计算倒伏指数与外部特征因素之间关系时, 将一种小麦品种中少量的第五节茎秆数据和第六节茎秆数据去掉, 减少对整体数据的干扰。

3、本文提到的茎秆第一节、第二节、第三节等序数, 都是从麦穗开始计数的。

2.3 倒伏指数公式的推导

文章题目给出茎秆倒伏指数为:

$$CLI = \frac{FW \times HCG}{MS}$$

其中 CLI 为茎秆倒伏指数, FW 为茎秆鲜重, HCG 为茎秆重心高度, MS 为茎秆机械强度。

2007 年矮抗 58、新麦 208 和周麦 18 三个品种的小麦数据中, 茎秆倒伏指数的三个计算指标都包括, 但是在 2008 年数据中, 三个计算指标都没有已知的数据; 2011 年数据中, 茎秆鲜重和茎秆机械强度两个指标数据都没有已知数据。因此分别需要计算 2008 年的茎秆鲜重、茎秆重心高度、茎秆机械强度指标, 以及 2011 年茎秆重心高度和茎秆机械强度指标。

1、机械强度计算公式

因 2008 年数据是在小麦将近成熟时测量的, 即属于蜡熟期数据, 而 2011 年数据中即包括灌浆期, 又包括蜡熟期, 而小麦各时期的茎秆结构存在明显的差异。因此需要根据 2007 年小麦各时期的数据分别得到灌浆期和蜡熟期的机械强度公式, 因不同品种之间的机械强度影响因素基本相同^[3], 可以将求得的灌浆期和蜡熟期的机械强度公式推广到其他品种小麦中。

假设: 小麦茎秆的机械强度和各节的长、粗及壁厚存在显著的相关性。

将 2007 年矮抗 58、新麦 208 和周麦 18 三个品种的小麦数据输入到 SPSS13.0 中,

综合分析三个品种的茎秆长、粗、壁厚对机械强度的影响。考虑到小麦不同节茎秆指标数据之间存在多重共线性，通过逐步回归来拟合机械强度与各节长、粗和壁厚的回归模型，得到结果如下：

(1) 蜡熟期机械强度模型

表 1 蜡熟期机械强度回归模型显著性与参数检验

	非标准化		标准化	t值	显著性	F值	显著性
	系数	标准误	系数				
常量	-.597	.146		-4.100	.000	50.124	.000
W ₂	3.862	.545	.786	7.080	.000		

上述结果显示：蜡熟期机械强度的回归模型 F 值统计量为 50.124，对应的概率 P 值小于显著性水平 0.05，说明模型拟合效果非常好。通过参数检验可知，小麦茎秆基部第四节的粗对小麦机械强度存在显著的正作用（ $\beta = 3.862, p < 0.05$ ）。得到的蜡熟期机械强度模型为：

$$MS = -0.597 + 3.862 \times W_2 \tag{1}$$

其中，W₂ 为茎秆穗下第二节的粗。

(2) 灌浆期机械强度模型

表 2 灌浆期机械强度回归模型显著性与参数检验

步骤		非标准化		标准化	t值	显著性	F值	显著性
		系数	标准误	系数				
1	常量	-.200	.176		-1.138	.264	21.454	.000
	W ₂	3.137	.677	.634	4.632	.000		
2	常量	-1.095	.197		-5.554	.000	38.694	.000
	W ₂	2.897	.477	.585	6.069	.000		
	T	15.323	2.632	.561	5.821	.000		

结果显示：灌浆期机械强度回归模型通过两步得到最终模型，其 F 值统计量为 38.694，对应的概率 P 值小于显著性水平 0.05，说明模型拟合效果非常好。通过参数检验可知，小麦茎秆基部第四节的粗（ $\beta = 2.897, p < 0.05$ ）和壁厚（ $\beta = 15.323, p < 0.05$ ）都对小麦机械强度存在显著的正作用。得到的灌浆期机械强度模型为：

$$MS = -1.095 + 2.897 \times W_2 + 15.323 \times T \tag{2}$$

其中，W₂ 为茎秆穗下第二节的粗，T 为茎秆的壁厚。

2、茎秆鲜重计算公式

在 2008 年数据中，各品种小麦的数据只有每节的平均重量，并且该重量是干重，即晒干之后的重量，因此首先将 2008 年各品种小麦各节的干重数据求得，再根据小麦各节干重与鲜重之间的关系，求得 2008 年小麦各节的鲜重，最终得到各品种小麦的茎秆鲜重。

第一步：计算各节茎秆干重

根据文中 1.4 中的假设 1，根据质量=体积×密度公式，小麦各节的质量公式为：

$$m_{ij} = \frac{L_{ij} \times \pi W_{ij} \times \rho_{ij}}{\sum_{j=1}^n (L_{ij} \times \pi W_{ij} \times \rho_{ij}) / n} \times \bar{m}_i = \frac{L_{ij} \times W_{ij}}{\sum_{j=1}^n (L_{ij} \times W_{ij}) / n} \times \bar{m}_i \quad (3)$$

其中, m_{ij} 表示第 i 节茎秆第 j 个样品的质量, L_{ij} 表示第 i 节茎秆第 j 个样品的长, W_{ij} 表示第 i 节茎秆第 j 个样品的粗, n 为每个小麦品种的样品数, \bar{m}_i 为第 i 节茎秆的平均质量。

基于公式 (3), 计算得到 2008 年国信 1 号、智 9998、联丰 58 和 TM 四个品种的小麦中所有样品的各节茎秆的质量。

第二步: 计算各节茎秆鲜重

根据文中 1.4 中的假设 3, 利用 2011 年矮抗 58 和周麦 18 两个品种小麦的鲜重数据与 2008 年矮抗 58 和周麦 18 两个品种小麦的干重数据, 计算出小麦各节的单位鲜重晒干之后的干重值。公式建立步骤如下:

- (1) 分别计算 2008 年矮抗 58 和周麦 18 第 i 节长 L_i 、质量 m_i 的平均值, 以及 2011 年矮抗 58 和周麦 18 每一节长 L_i' 、质量 m_i' 的平均值, 其中 2008 年为干重, 2011 年为鲜重;
- (2) 分别计算矮抗 58 和周麦 18 干重与鲜重的比例: m_i 的平均值 / m_i' 的平均值;
- (3) 为了消除小麦茎秆的长度对鲜重和干重比例的影响, 在干重与鲜重的比例上乘以小麦鲜重与干重的长度比 L_i' 的平均值 / L_i 的平均值;
- (4) 为了消除小麦茎秆自身的鲜重对干重与鲜重比例的影响, 在第 (3) 步的基础上, 除以小麦鲜重质量 m_i' 的平均值, 得到单位鲜重下的干重与鲜重的比例值 α , 为:

$$\alpha = \bar{m}_i / \bar{m}_i' \times \bar{L}_i' / \bar{L}_i \times 1 / \bar{m}_i' = \frac{\bar{m}_i \times \bar{L}_i'}{(\bar{m}_i')^2 \times \bar{L}_i} \quad (4)$$

- (5) 求矮抗 28 和周麦 18 两个 α 的平均值, 作为各小麦品种单位鲜重的干重与鲜重比例值。

最终根据上述公式计算得到矮抗 58、周麦 18 及各品种单位鲜重的干重与鲜重比例值, 结果如下:

表 3 矮抗 58、周麦 18 及各品种单位鲜重的干重与鲜重比例值

	穗下第一节	穗下第二节	穗下第三节	穗下第四节	穗下第五节
矮抗 58	0.24	0.27	0.17	0.14	0.18
周麦 18	0.23	0.25	0.16	0.14	0.12
各品种综合值	0.235	0.260	0.165	0.142	0.150

表 3 数据显示: 矮抗 58 与周麦 18 各节茎秆单位鲜重的干重与鲜重比例值非常接近, 因此可以认为文中 1.4 中的假设 3 非常合理。由于在 2008 年部分数据存在穗下第六节的数据, 而 2011 年的数据不能与之相对应, 结合表 3 数据中穗下第四节和第五节单位鲜重的干重与鲜重比例值非常接近, 我们假设穗下第六节单位鲜重下干重与鲜重的比例值同第五节相同, 即同为 0.150。

通过上述各节的干重与鲜重的比例值, 求得 2008 年各品种小麦各节茎秆的鲜重值。

第三步: 计算穗的鲜重

在 2008 年数据中, 给出各品种小麦穗的干重平均值, 根据文中 1.4 中的假设 1, 同上述求茎秆鲜重方法和原理一样, 求得各品种穗的鲜重值, 即根据上面第一步求得各节

各样品穗的干重，再根据上面第二步求得各节各样品穗的干重与鲜重比例值，最终得到各节各样品穗的鲜重值。

第四步：计算单茎小麦的茎秆鲜重

通过上述三步的计算，已经得到各节茎秆的鲜重，和各单茎样品小麦穗的鲜重，将两者加总即得到单茎小麦的茎秆鲜重。

3、茎秆重心高度计算公式

在 2008 年的数据中，由于小麦的各节茎秆的重量只有一个平均值，因此首先根据 1.4 中的假设 1，利用各节茎秆的重量、长、粗数据反推出各节的重量。

根据文中 1.4 中的假设 5，利用杠杆原理计算重心位置，具体公式为：

$$\begin{cases} G_i = G_{i-1} + \frac{m_i(\sum_{j=1}^n L_j - G_i + \frac{L_{i-1}}{2})}{m_i + m_{i-1}}, (i = 2, 3 \dots n); \\ G_1 = L_1 / 2; \end{cases} \quad (5)$$

其中， L_i 为第 i 节茎秆或穗的高度或长度， m_i 为第 i 节茎秆或穗的重量， G_i 为第 i 节茎秆的重心高度。

4、最终的倒伏指数计算公式

因 2008 年数据中没有各茎秆和穗的鲜重，因此 2008 年数据中的国信 1 号、智 9998、联丰 58 和 TM 四个品种倒伏指数计算公式为：

$$\begin{cases} CLI = \frac{FW \times HCG}{MS} \\ FW = \sum_{i=1}^n m_i \alpha + m_{\text{穗}} \\ HCG = G_i \end{cases} \quad (6)$$

由于 2008 年的小麦数据都是为蜡熟期，因此将（1）式直接带入到（6）式，得到国信 1 号、智 9998、联丰 85 和 TM 四个品种的最终倒伏指数计算公式：

$$CLI = \frac{G_i \times \sum_{i=1}^n (m_i \alpha + m_{\text{穗}})}{-0.597 + 3.862 \times W_4} \quad (7)$$

其中 $m_{\text{穗}}$ 为单茎小麦穗的鲜重值。

2011 年的平安 6 号、温麦 6 号、周麦 22、郑麦 9023 和豫麦 18 五个品种小麦的倒伏指数公式为：

$$\begin{cases} CLI_{\text{蜡熟期}} = \frac{G_i \times \sum_{i=1}^n (m_i \alpha + m_{\text{穗}})}{-0.597 + 3.862 \times W_2} \\ CLI_{\text{灌浆期}} = \frac{G_i \times \sum_{i=1}^n (m_i \alpha + m_{\text{穗}})}{-1.095 + 2.897 \times W_2 + 15.323 \times T} \end{cases} \quad (8)$$

其中，根据 2011 年小麦数据时期的不同，分别分为蜡熟期和灌浆期两种公式。

2.4 各品种小麦倒伏指数结果

根据上述倒伏指数计算公式，分别将 2007 年数据中矮抗 28、新麦 208 和周麦 18 三种品种，2008 年数据中国信 1 号、智 9998、联丰 58 和 TM 四种品种，2011 年平安 6 号、温麦 6 号、周麦 22、郑麦 9023 和豫麦 18 五种品种的倒伏指数计算结果分别如下：

表 4 2007 年三种小麦品种各时期的倒伏指数

品种	时期	重心高度（含穗）（cm）	机械强度(kg)	茎秆鲜重（g）	倒伏指数
矮抗 58	蜡熟期	43.41	0.48	8.10	767.82
	乳熟期	39.53	0.55	8.63	672.34
	灌浆期	33.75	0.76	8.78	425.35
	开花期	30.33	0.81	8.73	360.86
新麦 208	蜡熟期	52.13	0.34	7.63	1201.91
	乳熟期	43.57	0.39	7.80	891.90
	灌浆期	39.68	0.45	7.81	761.50
	开花期	33.83	0.42	5.68	487.73
周麦 18	蜡熟期	46.38	0.34	6.74	965.77
	乳熟期	43.64	0.58	9.94	787.50
	灌浆期	36.99	0.48	8.38	675.11
	开花期	34.79	0.71	9.81	491.79

表 5 2008 年四种小麦品种蜡熟期的倒伏指数

	茎秆鲜重（g）	重心高度（含穗）（cm）	机械强度（kg）	倒伏指数
国信 1 号	6.71	42.89	1.04	296.66
智 9998	6.83	39.38	0.69	457.62
联丰 85	7.89	37.04	1.22	240.68
TM	12.98	40.44	2.33	231.08

表 6 2011 年五种小麦品种的倒伏指数

	时期	茎秆鲜重（g）	重心高度（含穗）（cm）	机械强度（kg）	抗倒伏指数
平安 6 号	蜡熟期	6.53	42.96	1.61	175.27
温麦 6 号	灌浆期	8.27	38.37	1.87	172.29
周麦 22	灌浆期	7.89	38.90	2.09	152.07
	蜡熟期	5.82	50.46	1.36	215.12
郑麦 9023	灌浆期	6.77	46.73	1.53	206.78
	蜡熟期	4.39	54.88	1.20	201.78
豫麦 18	蜡熟期	5.25	40.24	1.27	173.29

表 4 和表 6 的数据显示：矮抗 28、新麦 208 和周麦 18 三种品种的小麦四个时期的倒伏指数都随着小麦越来越成熟，小麦茎秆越容易倒伏（倒伏指数越大）。由于不同年份数据之间通过不同的倒伏指数估算公式，得到的三年倒伏指数之间存在一定的差异，因此比较不同品种之间的抗倒伏能力，应在同一年比较。

由此可知：2007 年三种小麦品种的抗倒伏能力由大到小排序分别为：矮抗 58>周麦 18>新麦 208；2008 年四种小麦品种的抗倒伏能力由大到小排序分别为：TM>联丰 58>国信 1 号>智 9998；2011 年的五种小麦品种的抗倒伏能力由大到小排序分别为：温麦 6 号≥豫麦 18≥平安 6 号≥周麦 22 号≥郑麦 9023。

3 问题二解答-

——判断倒伏指数与茎秆外部特征的关系

3.1 问题分析

本节需要考虑小麦茎秆外部特征与倒伏指数之间的相关性，茎秆外部特征包括：株高、穗长、各节间长、节间长度比、节间粗度比、各节壁厚、穗重、鲜重等。题目要求分析小麦茎秆外部特征与倒伏指数在最易引起倒伏期的相关性，从第一部分的分析，我们知道小麦在蜡熟期的倒伏指数最大，最易发生倒伏，因此在该部分，将重点分析各品种小麦在蜡熟期的茎秆外部特征与倒伏指数的关系。

首先原始数据中缺乏较多的外部特征数据，需要利用现有的数据重新计算得到；其次不同年份不同品种小麦之间的数据不相同，需要分别考虑各个品种之间外部特征与倒伏指数之间的关系；最后综合各品种都有的外部特征数据，分析小麦外部特征与倒伏指数之间的相关性，并针对不同小麦品种，建立倒伏指数模型。

该节还需要在此基础上，判断小麦倒伏与未倒伏的原因。虽然题目要求根据 2008 年国信 1 号与智 9998 品种的数据来分析倒伏与未倒伏的原因，但是我们将根据这两种品种的倒伏数据与其他未倒伏数据建立一个小麦通用的倒伏判别数学模型，提高模型的通用性。

3.2 倒伏指数与茎秆外部特征的相关性分析

前人文献显示，茎秆倒伏与相邻节间的长度比、相邻节间的粗度比之间可能存在相关性，与不相邻节间的长度比、粗度比之间没有显著的相关性，因此为了便于计算，本节只考虑小麦相邻茎秆的长度比、粗度比与倒伏指数的相关关系，不考虑不相邻茎秆的长度比、粗度比与倒伏指数的相关关系。

3.2.1 茎秆外部特征的非参数 Spearman 秩和相关检验

由于小麦茎秆外部特征因素非常多，因此在建立外部特征与倒伏指数之间关系之前，先分析茎秆外部特征的相关性，从中了解到各个外部特征之间的相关性强弱，并了解外部特征之间的多重共线性强弱，便于接下来通过外部特征建立倒伏指数模型时选择正确的方法。如果外部特征存在非常明显的多重共线性，那么可以通过逐步回归或主成分分析法来建立倒伏指数模型。

斯皮尔曼（Spearman）相关系数是描述两组变量之间是否存在相同或相反趋同性的一种指标，由于该检验不需要假定服从正态分布，仅需要确定变量在每个点（时期）上的等级即可获得，因此具有较好的性质。在两组数据都没有重复观测值的情况下，斯皮尔曼等级相关系数的公式为：

$$r_{sp} = 1 - \frac{6 \sum d_i^2}{n(n^2 - 1)} \quad (9)$$

其中 d_i 表示两组数据的等级之差， n 为样本量。

根据原始数据，分别计算得到小麦茎秆的外部特征包括：株高、穗长、各节间长、节间长度比、节间粗度比、各节壁厚、穗重、鲜重，各小麦品种它们之间的相关性如下：

和其它的推断一样，当以样本的数据来推测总体时，由于样本带有随机性，在小样本时数据间有相关，但总体之间不一定相关。因此有必要进行假设检验。在此，设定原

假设 H_0 研究的总体之间无相关（即 $\rho=0$ ），否则假设为 H_1 研究的总体之间有相关（即 $\rho \neq 0$ ）。

检验的样本估计量为样本的相关系数 r_{SP} ，在小样本的情况下通常临界值的 r 可直接查表，但在大样本的情况下可以通过变换

$$t = r_{SP} \sqrt{\frac{n-2}{1-r_{SP}^2}} \quad (10)$$

服从 $t(n-2)$ 的 t 分布，采用 t 检验。运用 SPSS13.0 软件，得到小麦茎秆外部特征的斯皮尔曼检验结果（由于数据非常多，分析结果不便放入文中，文后将重点分析影响倒伏指数的外部特征因素之间的相关性）。

小麦外部特征因素之间的 spearman 相关结果显示，不同小麦品种之间存在基本相同的现象：株高与各节的长较多呈现显著的正向相关，鲜重与各节的鲜重较多呈现显著的正向相关，这是因为在株高、鲜重的数据是通过各节的长、鲜重加总得到的。除此之外，小麦的鲜重和各节的粗也存在一定的相关性，但是在不同小麦品种间相关性大小并不一致，有的偏大，有的偏小。其他外部特征之间无明显的相关关系。

3.2.2 建立倒伏指数与小麦外部特征模型

从上述小麦外部特征因素的相关分析可知，部分因素之间一定的高相关性，并且因素的数量较多，因此选择逐步回归来建立倒伏指数与外部特征因素之间的模型。运用 SPSS13.0 软件，得到结果如下表 7（注：所有结果基于双边检验，下同）：

表 7 2008 年各品种倒伏指数回归模型显著性与参数检验

品种	筛选出的变量	非标准化		标准化	t值	显著性	F值	显著性
		系数	标准误	系数				
矮抗 58	常量	-261.493	20.631		-12.675	.000	327.757	.000
	L	5.642	.298	.591	18.925	.000		
	$L_{穗}$	10.480	1.891	.148	5.541	.000		
	W_{12}	433.913	11.931	1.420	36.368	.000		
	W_1	-868.043	28.361	-1.176	-30.607	.000		
	L_1	-1.449	.471	-.097	-3.075	.005		
	W_4	61.856	22.952	.068	2.695	.013		
周麦 18	常量	509.804	118.247		4.311	.000	7.700	.000
	m_5	348.475	109.077	1.527	3.195	.003		
	W_3	-602.762	238.513	-.339	-2.527	.016		
	L_5	-54.720	24.062	-1.086	-2.274	.030		
	常量	-569.759	82.417		-6.913	.000		
国信1 号	W_{12}	929.728	112.229	1.508	8.284	.000	268.526	.000
	W_1	-1962.099	260.218	-.901	-7.540	.000		
	L	5.449	.533	.333	10.216	.000		
	$L_{穗}$	17.588	2.763	.186	6.366	.000		
	W_2	517.297	214.561	.323	2.411	.026		
	W_5	-126.945	54.644	-.067	-2.323	.031		
智 9998	常量	-1935.967	362.165		-5.346	.000	146.081	.000
	W_2	4403.768	654.280	1.073	6.731	.000		
	W_{12}	2508.411	200.744	2.267	12.496	.000		
	W_1	-7170.115	620.051	-1.160	-11.564	.000		
	L	9.750	3.660	.112	2.664	.012		
联丰 85	常量	-445.892	93.392		-4.774	.000	807.261	.000
	W_{23}	179.665	69.674	.499	2.579	.015		
	$m_{穗}$	42.061	2.279	.250	18.459	.000		
	m_1	-20.334	7.688	-.096	-2.645	.013		
	W_2	-478.398	147.227	-.554	-3.249	.003		
	L	5.350	.217	.651	24.650	.000		
	W_{12}	334.523	58.839	.973	5.685	.000		
	L_5	1.104	.281	.065	3.933	.000		
	W_1	-520.791	130.159	-.494	-4.001	.000		
	W_3	385.387	134.967	.373	2.855	.008		
TM	常量	-59.903	41.226		-1.453	.158	239.684	.000
	W_3	-352.133	19.839	-.612	-17.749	.000		
	m_1	27.069	1.623	.479	16.674	.000		
	L	7.908	.574	.610	13.775	.000		
	L_1	-5.463	.714	-.324	-7.647	.000		
	L_2	-3.889	1.034	-.122	-3.761	.001		
	m_6	-25.578	5.851	-.127	-4.371	.000		
	W_{23}	23.028	8.483	.104	2.715	.011		

表 7 显示, 矮抗 58、周麦 18、国信 1 号、智 9998、联丰 86 和 TM 六种小麦品种的倒伏指数都与一定的茎秆外部特征存在显著的关系, 六种品种的倒伏指数与茎秆外部特征因素的模型都非常理想。模型显著性检验的 F 值统计量在 0.05 的显著性水平下都非常显著。因此模型可以进行预测或推广。六种小麦的倒伏指数模型分别为:

矮抗 58:

$$CLI = -261.493 + 5.642L + 10.480L_{\text{穗}} + 433.913W_{12} - 868.043W_1 - 1.449L_1 + 61.856W_4$$

周麦 18:

$$CLI = 509.804 + 348.475m_5 - 602.762W_3 - 54.720L_5$$

国信 1 号:

$$CLI = -569.759 + 929.728W_{12} - 1962.099W_1 + 5.499L + 17.588L_{\text{穗}} + 517.297W_2 - 126.945W_5$$

智 9998:

$$CLI = -1935.967 + 4403.768W_2 + 2508.411W_{12} - 7170.115W_1 + 9.750L$$

联丰 85:

$$CLI = -445.892 + 179.665W_{23} + 42.061m_{\text{穗}} - 20.334m_1 - 478.398W_2 + 5.350L + 334.523W_{12} + 1.104L_5 - 520.791W_1 + 385.387W_3$$

TM:

$$CLI = -59.903 - 352.133W_3 + 27.069m_1 + 7.908L - 5.463L_1 - 3.889L_2 - 25.578m_6 + 23.028W_{23}$$

上述六种小麦的倒伏指数模型及参数检验中的标准化系数显示(见表 7): 对于矮抗 58 品种, 小麦茎秆的倒伏指数与株高、穗长、一二节粗度比、第四节粗成显著正相关, 即随着这些因素的不断增加, 小麦茎秆倒伏指数将越来越大, 小麦茎秆越容易倒伏, 并且一二节粗度比对倒伏指数影响最大; 第一节的长对茎秆倒伏指数存在显著的负作用, 即随着该因素的不断增加, 倒伏指数越小, 茎秆越抗倒。

对于周麦 18 品种, 小麦茎秆倒伏指数与第五节茎秆的鲜重成显著正相关, 与第三节粗和第五节长成显著负相关。

对于国信 1 号品种, 茎秆的倒伏指数与一二节粗度比、株高、穗长、第二节粗成显著正相关, 其中一二节粗度比影响最大; 与第一节粗、第五节粗成显著负相关, 其中第一节粗影响最大。

对于智 9998 品种, 茎秆的倒伏指数与第二节粗、一二节粗度比和株高成显著正相关, 其中一二节粗度比影响最大; 与第一节粗成显著负相关。

对于联丰 85 品种, 茎秆的倒伏指数与二三节粗度比、穗鲜重、株高、一二节粗度比、第五节茎秆长和第三节粗成显著正相关, 其中第三节粗和一二节粗度比影响最大; 与第一节鲜重、第二节粗和第一节粗成显著负相关。

对于 TM 品种, 茎秆的倒伏指数与第一节鲜重、株高和二三节粗度比成显著的正相关, 与第一节长、第二节长和第六节鲜重成显著负相关。

综述分析可知: 小麦的倒伏指数主要与株高、一二节粗度比、穗长成显著正相关, 即随着这些不断增加, 小麦越容易倒伏, 其中一二节粗度比在不同品种小麦中影响都非常大; 小麦的倒伏指数主要与第一节粗、第二节粗成显著负相关, 即随着这些不断增加, 小麦越不容易倒伏。

表 8 2011 年各品种倒伏指数回归模型显著性与参数检验

品种	筛选出的变量	非标准化		标准化	t值	显著性	F值	显著性
		系数	标准误	系数				
平安6号	常量	147.011	25.210		5.832	.001	147.705	.000
	L_2	14.570	.721	.806	20.198	.000		
	W_{23}	-240.569	17.965	-.538	-13.391	.000		
	B_3	61.089	13.489	.191	4.529	.003		
	W_{12}	60.265	16.535	.142	3.645	.008		
	m_1	25.299	10.241	.115	2.470	.043		
温麦6号	常量	-5.136	7.768		-.661	.515	44.240	.000
	$m_{穗}$	4.165	.325	.963	12.813	.000		
	L_5	1.592	.383	.329	4.158	.000		
	W_{45}	10.469	3.534	.225	2.963	.007		
	W_{23}	-12.277	5.135	-.172	-2.391	.025		
郑麦9023	常量	21.120	1.766		11.960	.000	106.660	.000
	FW	2.949	.508	.762	5.800	.000		
	W_2	-7.607	.723	-.798	-10.528	.000		
	$m_{穗}$	4.160	.872	.614	4.771	.000		
周麦22	常量	2.734	3.025		.904	.380	216.889	.000
	FW	1.347	.256	.464	5.254	.000		
	W_2	-7.436	.457	-.782	-16.255	.000		
	L	.364	.044	.344	8.365	.000		
	$m_{穗}$	3.662	.421	.741	8.703	.000		
豫麦18	常量	-25.485	6.407		-3.978	.003	214.844	.000
	W_{12}	44.532	6.457	1.268	6.897	.000		
	$m_{穗}$	4.953	.602	.479	8.232	.000		
	W_1	-12.190	2.434	-.679	-5.008	.001		
	m_3	11.306	2.209	.290	5.118	.001		
	W_3	6.844	2.312	.628	2.960	.016		

通过表 8 结果可知，平安 6 号、温麦 6 号、郑麦 9023、周麦 22 和豫麦 18 的倒伏指数与茎秆外部特征的模型非常理想，F 值统计量对应的概率 P 值都小于显著性 0.05，说明模型都通过显著性检验。因此模型可以进行预测或推广。五种小麦的倒伏指数模型分别为：

平安 6 号：

$$CLI = 147.011 + 14.570L_2 - 240.569W_{23} + 61.089B_3 + 60.265W_{12} + 25.299m_1$$

温麦 6 号：

$$CLI = -5.136 + 4.165m_{穗} + 1.592L_3 + 10.469W_{45} - 12.277W_{23}$$

郑麦 9023：

$$CLI = 21.120 + 2.949FW - 7.607W_2 + 4.160m_{穗}$$

周麦 22：

$$CLI = 2.734 + 1.347FW - 7.436W_2 + 0.364L + 3.662m_{穗}$$

豫麦 18:

$$CLI = -25.485 + 44.532W_{12} + 4.923m_{穗} - 12.190W_1 + 11.306m_3 + 6.844W_3$$

上述五种小麦的倒伏指数模型及参数检验中的标准化系数显示（见表 8）：对于平安 6 号品种，小麦茎秆的倒伏指数与第二节长、第三节壁厚、一二节粗度比和第一节重成显著正相关，即当这些指标值增加时，会引起倒伏指数的增加，从而增加小麦茎秆的倒伏性，其中第二节长的影响作用最大；倒伏指数与二三节粗度比成显著负相关，即随着该指标值增加，会引起倒伏指数降低，增加茎秆的抗倒伏性。

对于温麦 6 号品种，小麦茎秆的倒伏指数与穗重、第三节长、四五节粗度比成显著正相关，其中穗重的影响作用最大；与二三节粗度比成显著负相关。

对于郑麦 9023 品种，小麦茎秆的倒伏指数与茎秆鲜重和穗重成显著正相关，与第二节粗成显著负相关。

对于周麦 22 品种，小麦的倒伏指数与茎秆鲜重、第一节长和穗重成显著正相关；与第二节粗成显著负相关。

对于豫麦 18 品种，小麦的倒伏指数与一二节粗度比、穗重、第三节鲜重和第三节粗成显著正相关，与第一节粗成显著负相关。

综上所述可知，对于上述五种小麦品种，茎秆的倒伏指数主要和一二节粗度比和穗重成显著正相关，与茎秆的粗成显著负相关，结合上面 2008 年六种小麦品种的倒伏指数与茎秆外部特征的关系，发现 2008 年六种小麦品种的倒伏指数存在更多的共性，因此运用 2008 年六种品种的数据拟合各小麦品种的倒伏指数与茎秆外部特征的通用模型。结果如下：

表 9 各品种倒伏指数通用回归模型显著性与参数检验

筛选出的变量	非标准化		标准化	t值	显著性	R ²	F值	显著性
	系数	标准误	系数					
常量	-262.341	68.521		-3.829	.000			
W_{12}	1189.349	64.373	1.651	18.476	.000			
W_1	-2820.757	219.367	-1.749	-12.859	.000			
W_2	877.623	112.753	.954	7.784	.000			
m_1	232.097	31.967	1.053	7.260	.000			
$m_{穗}$	133.693	23.372	.400	5.720	.000	.897	83.935	.000
L_{12}	-90.861	20.501	-.164	-4.432	.000			
W_3	-454.691	108.189	-.394	-4.203	.000			
L_5	9.882	2.664	.128	3.709	.000			
m_3	80.535	28.187	.287	2.857	.005			
$L_{穗}$	-20.021	7.404	-.364	-2.704	.007			

通过上表可知，各品种小麦的倒伏指数与茎秆外部特征的回归模型拟合效果非常理想，F 值统计量为 83.935，对应的概率 P 值小于显著性 0.05，通过显著性检验。说明模型拟合效果很好，可以应用和推广。并且模型的判定系数为 0.897，非常接近 1，说明自变量茎秆外部特征可以解释因变量倒伏指数的 89.7% 的变化。通过逐步回归，共筛选出对倒伏指数存在显著影响的十个茎秆外部特征因素，分别为：一二节粗度比、第一节粗、第二节粗、第三节粗、第一节鲜重、第三节鲜重、穗重、一二节长度比、第三节长、穗

长。各品种小麦的倒伏指数与茎秆外部特征的通用模型为：

$$CLI = -262.341 + 1189.349W_{12} - 2820.757W_1 + 877.623W_2 + 232.097m_1 + 133.693m_{\text{穗}} - 90.861L_{12} - 454.691W_3 + 9.882L_3 + 80.535m_3 - 20.021L_{\text{穗}}$$

模型显示：一二节粗度比、第二节粗、第一节鲜重、穗重、第三节长、第三节鲜重对小麦茎秆的倒伏指数成显著的正作用，即随着这些指标值的增大，小麦茎秆都将越容易倒伏，其中一二节粗度比对倒伏指数影响最大，第三节长影响最小；第一节粗、一二节长度比、第三节粗和穗长对小麦茎秆的倒伏指数成显著的负作用，即随着这些指标值的增大，小麦茎秆都将越不容易倒伏，其中第一节粗对倒伏指数影响最大，一二节长度比影响最小。这些都与各品种的倒伏指数与茎秆外部特征的单独模型非常接近，特别是一二节粗度比和第一节粗对倒伏指数的影响作用。

3.2.3 茎秆外部特征的相关性分析

上面已经找出不同小麦品种茎秆倒伏指数的影响因素，接下来具体来看不同小麦品种影响倒伏指数的外部特征之间相关性如何。运用 SPSS13.0，得到结果如下：

矮抗 58 和周麦 18 两种品种中，对小麦茎秆倒伏指数有显著影响的因素之间 spearman 相关系数如下表 10 和表 11（因小麦品种较多，分析数据过多，其他品种的外部特征数据见附件一）：

表 10 矮抗 58 外部特征 spearman 相关分析

外部特征	L	$L_{\text{穗}}$	W_{12}	W_1	L_1	W_4
L	1.000					
$L_{\text{穗}}$	.623(**)	1.000				
W_{12}	-.184	-.435(**)	1.000			
W_1	-.100	-.404(**)	.712(**)	1.000		
L_1	.521(**)	.140	-.055	.192	1.000	
W_4	.040	.253	-.075	.075	.015	1.000

注：基于双边检验，* $p < 0.05$ ，** $p < 0.01$ ，*** $p < 0.001$ ，下同。

表 11 周麦 18 外部特征 spearman 相关分析

外部特征	m_5	W_3	L_5
m_5	1.000		
W_3	-.011	1.000	
L_5	.948(**)	.008	1.000

上述两表显示，在矮抗 58 品种中，株高与穗长、穗下第一节长成显著正相关关系（ $\beta = 0.623, p < 0.01$ ， $\beta = 0.521, p < 0.01$ ）；穗长与一二节粗度比、穗下第一节粗成显著负相关关系（ $\beta = -0.435, p < 0.01$ ， $\beta = -0.404, p < 0.01$ ）；一二节粗度比与穗下第一节粗成显著正相关关系（ $\beta = 0.712, p < 0.01$ ）；其余外部特征之间并不存在显著的相关关系。

在周麦 18 品种中，只有穗下第五节鲜重与穗下第五节长成显著正相关关系（ $\beta = 0.948, p < 0.01$ ），这是由于是同一节茎秆的外部特征，其余外部特征变量之间不存在显著的相关关系。

在其他小麦品种中，小麦茎秆外部特征之间大多呈现不相关或者弱相关（具体参见附件一），其中平安 6 号和温麦 6 号两种小麦品种中，各茎秆外部特征之间都不存在显

著的相关关系。

3.3 判断小麦倒伏的原因

3.3.1 数据处理

将 2008 年矮抗 58、周麦 18、国信 1 号、智 9998、联丰 85 和 TM 六种小麦品种的数据增加一个“是否倒伏”指标，指标值包括 0 和 1，其中 0 表示倒伏，1 表示未倒伏。则根据题意，国信 1 号和智 9998 两种品种的小麦“是否倒伏”指标值都为 1，其他品种小麦“是否倒伏”指标值都为 0。在 3.2 处理 2008 年数据的基础上，仍然考虑株高、穗长、各节间长、节间长度比、节间粗度比、各节壁厚、鲜重八种小麦茎秆外部特征，建立小麦倒伏判别模型。

3.3.2 建立小麦倒伏判别模型

将“是否倒伏”作为因变量，小麦茎秆外部特征因素作为自变量，运用 SPSS13.0 软件，通过 Forward Wald 法进行筛选自变量，迭代次数为 20 次，建立 Logistic 模型。考虑自变量较多，数据相对较少，增加自变量进入的概率，将自变量参数检验的显著性水平设为 0.1。得到计算结果为：

1、模型拟合的结果

表 12 Logistic 回归模型拟合结果

	B	S.E.	Wald	df	Sig.	Exp(B)
W_2	-66.9915	21.1989	9.9865	1	0.0016	0.0000
L_5	1.2185	0.5286	5.3139	1	0.0212	3.3821
W_5	-74.9275	25.6355	8.5428	1	0.0035	0.0000
L	0.4772	0.1974	5.8419	1	0.0156	1.6116
L_{12}	-8.6463	4.6629	3.4383	1	0.0637	0.0002
常量	31.0688	14.0198	4.9110	1	0.0267	3.1116×10^{13}

Logistic 回归模型经过六步筛选得到表 12 最终的理想结果，结果显示：穗下二节粗、穗下五节长、穗下五节粗、株高和一二节长度比对小麦茎秆是否倒伏存在显著的作用。得到 Logistic 回归模型为：

$$\text{Log}\left(\frac{P}{1-P}\right) = 31.069 - 66.992W_2 + 1.219L_5 - 74.928W_5 + 0.477L - 8.646L_{12} \quad (11)$$

模型显示：穗下第二节粗、穗下第五节粗和一二节长度比越大，越不容易发生倒伏，而株高越高、穗下第五节越长，则越容易发生倒伏。

2、不同小麦品种发生倒伏的概率分布

根据上述建立的 Logistic 模型，计算每个品种发生倒伏的概率值，见下图：

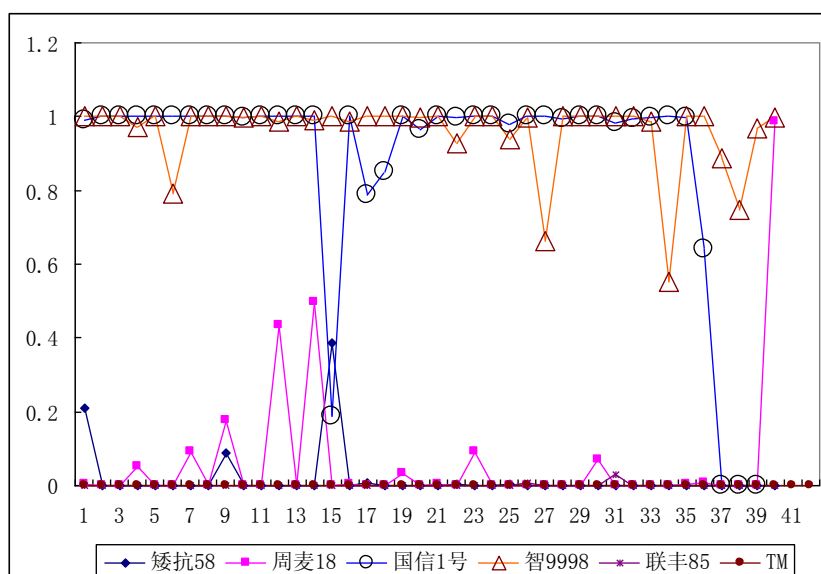


图 1 各品种小麦发生倒伏的概率分布

从图中可以看到，国信 1 号和智 9998 两种品种小麦发生倒伏的概率大多都在 1 左右徘徊，只有少数点远离 1，并且其他品种小麦发生倒伏的概率都在 0 的附近徘徊，也只有少数点发生倒伏的概率非常大，这说明上面建立的 *Logistic* 模型判别预测非常准确。接下来具体看模型的检验。

3、模型的检验

(1) 拟合优度检验

表 13 *Logistic* 模型检验

Step	-2 Log likelihood	Cox & Snell R Square	Nagelkerke R Square	Chi-square	df	Sig.
1	194.494	0.337	0.466	91.646	1	0.000
2	105.489	0.555	0.768	180.651	2	0.000
3	48.180	0.656	0.908	237.960	3	0.000
4	31.513	0.681	0.942	254.627	4	0.000
5	19.303	0.698	0.965	266.837	5	0.000
6	23.275	0.692	0.958	262.865	5	0.000

模型检验包括拟合优度检验、似然值检验、判定系数、卡方值及对应的概率 *P* 值，从表 13 可以看出，模型通过四步得到最理想的模型。对比每步的统计值，可知似然值在逐渐减小，*Cox & Snell* 和 *Nagelkerke* 判定系数在不断增加，卡方值也在同时增加，这些都说明模型越来越好，并且每步得到的模型卡方值对应的概率 *P* 值都小于显著性水平 0.05，说明该 *Logistic* 回归模型建立非常理想，可以用来预测。

(2) 模型预测正确率检验

表14 Logistic模型预测正确率

			Predicted		
			是否倒伏		Percentage Correct
			.00	1.00	
Step 1	是否倒伏	.00	122	25	83.0
		1.00	26	50	65.8
	Overall Percentage				77.1
Step 2	是否倒伏	.00	135	12	91.8
		1.00	11	65	85.5
	Overall Percentage				89.7
Step 3	是否倒伏	.00	143	4	97.3
		1.00	4	72	94.7
	Overall Percentage				96.4
Step 4	是否倒伏	.00	145	2	98.6
		1.00	1	75	98.7
	Overall Percentage				98.7
Step 5	是否倒伏	.00	145	2	98.6
		1.00	1	75	98.7
	Overall Percentage				98.7
Step 6	是否倒伏	.00	146	1	99.3
		1.00	1	75	98.7
	Overall Percentage				99.1

表14显示, *Logistic*模型从第一步到第六步, 预测小麦是否倒伏的正确率从65.8%一直增加到99.1%, 预测错误数从第一步的51次减小到第六步的2次, 说明该模型预测正确率非常高, 再次验证该模型的准确性, 可以用来做小麦的判定分析。

3.3.3 分析小麦倒伏的原因

通过上述小麦倒伏判别模型的建立, 找到影响小麦是否倒伏的因素, 分别为穗下二节粗、穗下五节长、穗下五节粗、株高和一二节长度比。由于这些指标的数据量较少, 分布上不呈正态分布, 所以利用非参数 *Mann-Whitney* 秩和检验, 判断在倒伏和未倒伏的小麦中, 上述这些因素是否存在显著差异, 存在什么样的差异。*Mann-Whitney* 秩和检验结果如下:

表 15 影响小麦倒伏因素的 Mann-Whitney 秩和检验

	W_2	L_5	W_5	L	L_{12}
Mann-Whitney U	1575	3973	2648.5	4092	5687
Wilcoxon W	4735	17176	5808.5	17295	8847
Z	-9.508	-4.777	-7.390	-4.541	-1.401
显著性	0.000	0.000	0.000	0.000	0.161
未倒伏平均秩	150.778	106.025	144.151	106.759	125.395
倒伏平均秩	59.937	151.709	73.525	150.203	111.987

表 16 影响小麦倒伏因素的描述统计

	样品数	W_2		L_5		W_5		L		L_{12}	
		均值	标准差	均值	标准差	均值	标准差	均值	标准差	均值	标准差
倒伏	79	0.380	0.076	6.244	2.048	0.374	0.089	79.366	8.055	1.650	0.274
未倒伏	162	0.546	0.147	4.840	2.312	0.453	0.162	74.038	11.493	1.721	0.286

表 15 的 *Mann-Whitney* 秩和检验结果显示，在显著性 0.05 水平下，穗下第二节粗、穗下第五节长、穗下第五节粗以及株高在倒伏和未倒伏的小麦中都存在显著差异，而一二节长度比在倒伏与未倒伏的小麦中不存在显著差异（ $Z=-1.401$ ， $p>0.05$ ）。从平均秩或者五个影响因素描述统计结果中（见表 16），可以具体看出：倒伏的小麦穗下第二节粗（0.380）比未倒伏（0.546）的要细很多；倒伏的小麦穗下第五节，即基部第一节的长（6.244）比未倒伏（4.840）的要长很多；倒伏小麦穗下第五节，即基部第一节的粗（0.374）比未倒伏（0.453）的要细的多；倒伏小麦的株高（79.366）要比未倒伏（74.038）的高很多；而倒伏与未倒伏小麦之间的穗下一二节长度比相差不大，并没有显著的差别。

综上所述，小麦发生倒伏的原因是基部第一节过于细长、自身茎秆的高度较高以及基部第三节过细造成的。

4 问题三解答

——分析小麦理想株型结构

4.1 问题的分析

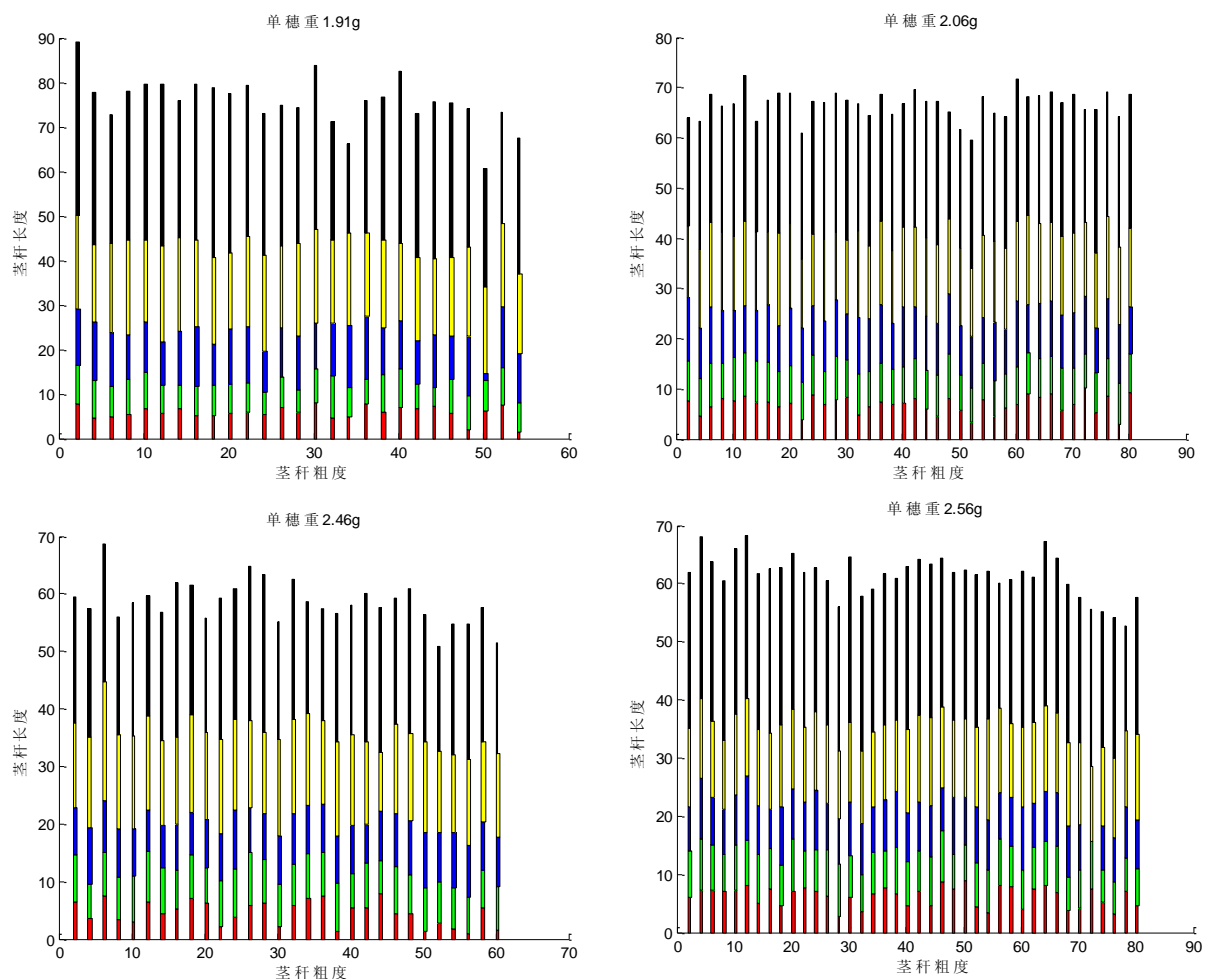
小麦理想株型应该至少表现为抗倒伏能力强、产量高两个特点，但是在规定各小麦单茎籽粒重的情况下，各小麦单茎的产量已经确定，那么对于单一茎秆来说，产量已确定，因此该问题主要通过抗倒伏能力来判断小麦的理想。

通过上述两个问题的解答，小麦茎秆的抗倒伏能力主要通过倒伏指数（见文章 2.2 部分）和倒伏概率（见文章 3.3 部分）来判断。下面首先根据这两个指标来判断哪些小麦茎秆为理想茎秆，再具体分析这些理想茎秆的株型结构。

4.2 小麦茎秆抗倒伏能力的分类

4.2.1 不同单穗重小麦株型结构分布

根据 2008 年所给的已知数据，按照小麦各茎秆的倒伏指数由大到小的排序，即抗倒伏能力由小到大排序，观察单穗重分别为 1.91g, 2.06g, 2.46g, 2.56g, 2.75g, 2.92g 的小麦长和粗的结构分布，见下图 2:



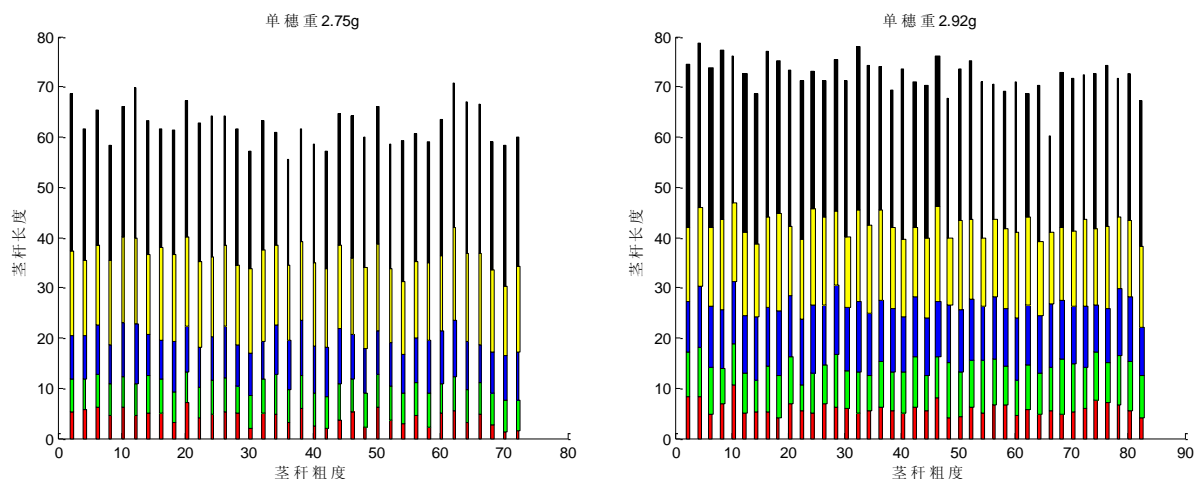


图 2 各单穗重小麦茎秆长和粗分布图

在图 2 中，纵坐标表示小麦茎秆的各节长，不同颜色从下往上分别表示基部第一节、基部第二节、基部第三节、基部第四节和基部第五节，横坐标表示茎秆的各节粗，不同颜色从下往上表示基部第一节、基部第二节、基部第三节、基部第四节和基部第五节。

从图 2 可以看出：小麦茎秆从基部第一节到第五节呈现越来越短。随着小麦倒伏指数逐渐减小，小麦抗倒伏能力越来越高，小麦茎秆的基部一、二、三节呈现越来越粗，并且基部第一二三节茎秆的长度相对于穗下第一节茎秆的长度有越来越短的变化特征。

4.2.2 利用 K-means 聚类对茎秆抗倒伏能力分类

K-means 聚类算法^[4]是由 *Mac Queen* 提出，该算法及其推广是数据挖掘及知识发现领域中的一种重要方法，它具有算法简单且收敛速度快的特点。

K-means 聚类挖掘过程^[5]：

- (1) 提取数据。将各分类指标数据输入到聚类挖掘库。
- (2) 选取聚类范围或聚类群(组)号及聚类个数 *K*。
- (3) 运用 *K-means* 算法进行空间聚类挖掘,完成聚类规则输出及其结果可视化。

K-means 算法的处理流程如下：1) 将所有对象随机分配到 *K* 个非空的类中；2) 计算每个类的平均值，并用该平均值代表相应的类；3) 将每个对象根据其与各个类中心的距离，重新分配到与其最近的类中；4) 转步骤 2)，直到准则函数收敛。

将六种单穗重小麦的倒伏指数与倒伏概率数据输入到 SPSS13.0 软件中，设置分类数为三类，得到分类结果如下：

表 17 各单穗重三类抗倒伏能力的类中心

单穗重 (g)	抗倒伏能力	Cluster		
		1	2	3
2.46	倒伏指数	279.67	229.25	184.39
	倒伏概率	.06111	.02622	.00000
2.75	倒伏指数	249.55	385.19	166.20
	倒伏概率	.05432	.01382	.17732
1.91	倒伏指数	369.67	248.63	625.50
	倒伏概率	.99734	.89374	1.00000
2.06	倒伏指数	678.37	369.62	1357.77
	倒伏概率	.99996	.95096	1.00000

2.56	倒伏指数	200.92	234.69	273.90
	倒伏概率	.00002	.00067	.00251
2.92	倒伏指数	313.71	243.00	192.62
	倒伏概率	.00000	.00000	.00000

根据表17的结果，将六种单穗重小麦每个类别的抗倒伏能力分为极强、非常强、较强、强、一般、弱、较弱、非常弱、极弱九个等级。其中，在单穗重为2.46g的小麦中，第一类包括5个样品数，抗倒伏能力表现为弱；第二类包括15个样品数，抗倒伏能力表现为一般；第三类包括10个样品数，抗倒伏能力表现为强。其他单穗重的三类的具体分类情况见表18。

表 18 六种单穗重小麦的三类抗倒伏能力分布

单穗重 (g)	第一类		第二类		第三类	
	样品数	抗倒伏能力	样品数	抗倒伏能力	样品数	抗倒伏能力
2.46	5	弱	15	一般	10	强
2.75	24	一般	7	弱	6	强
1.91	11	较弱	15	弱	1	非常弱
2.06	5	非常弱	33	弱	2	极弱
2.56	8	非常强	19	较强	13	强
2.92	7	一般	17	强	17	较强

4.3 分析各单穗重的理想株型结构

小麦理想株型结构包括株高、茎长、各节间长、各节茎外径、壁厚、茎秆自重、穗长、穗重等，但题目中要求的单穗重1.19g，2.06g，2.46g，2.56g，2.75g，2.92g对应的小麦株型结构数据只有各节长、各节粗、穗长三个指标数据，根据问题一中提出的公式，计算得到茎秆各节鲜重、穗鲜重、株高。这样，在该问题中小麦的株型结构包括各节长、各节粗、穗长、各节鲜重、穗鲜重、株高六种指标。

从表18中可知，1.91g，2.06g，2.46g，2.56g，2.75g，2.92g六种单穗重的抗倒伏能力最强类别分别为第一类、第一类、第三类、第一类、第三类、第三类。接下来对各单穗重抗倒伏能力最强类别对应的小麦株型结构进行分析，得到各单穗重小麦最佳的株型结构。

表 19 六种单穗重小麦各理想株型结构

	1.91				2.06			
	最小值	最大值	均值	标准差	最小值	最大值	均值	标准差
第一节长	29.10	38.30	33.955	2.608	21.90	29.10	25.600	2.604
第一节粗	0.29	0.40	0.333	0.036	0.28	0.38	0.322	0.044
第一节茎秆鲜重	1.02	1.74	1.366	0.214	0.81	1.11	0.962	0.130
第二节长	17.00	21.60	19.736	1.617	14.70	16.80	15.960	0.879
第二节粗	0.32	0.44	0.377	0.037	0.25	0.28	0.262	0.016
第二节茎秆鲜重	0.69	1.00	0.880	0.098	0.62	0.81	0.724	0.073
第三节长	9.20	13.40	11.400	1.541	9.30	11.40	10.100	0.869
第三节粗	0.40	0.58	0.464	0.057	0.38	0.48	0.420	0.041
第三节茎秆鲜重	0.79	1.33	1.041	0.186	0.79	1.03	0.934	0.091
第四节长	4.80	8.30	6.755	1.085	7.00	8.80	8.220	0.716
第四节粗	0.38	0.48	0.417	0.035	0.37	0.40	0.394	0.013
第四节茎秆鲜重	0.64	1.00	0.864	0.142	0.79	1.00	0.930	0.086
第五节长	4.60	6.80	5.600	0.677	6.50	8.50	7.620	0.746
第五节粗	0.32	0.47	0.388	0.042	0.40	0.47	0.426	0.027
第五节茎秆鲜重	0.47	0.87	0.675	0.113	0.87	1.20	1.054	0.127
穗长	7.60	10.30	8.991	0.921	8.30	9.00	8.760	0.279
穗鲜重	1.76	2.39	2.085	0.215	2.19	2.38	2.314	0.075
株高	81.90	89.20	86.436	2.463	72.20	81.40	76.260	3.416
	2.46				2.56			
	最小值	最大值	均值	标准差	最小值	最大值	均值	标准差
第一节长	18.10	25.80	22.690	2.506	18.10	27.30	24.363	2.966
第一节粗	0.28	0.38	0.336	0.031	0.35	0.42	0.376	0.025
第一节茎秆鲜重	0.68	1.23	0.978	0.159	0.72	1.32	1.044	0.176
第二节长	10.20	15.60	14.210	1.579	13.00	14.80	13.788	0.601
第二节粗	0.48	0.56	0.512	0.027	0.44	0.52	0.488	0.029
第二节茎秆鲜重	0.69	1.15	0.992	0.133	0.77	1.04	0.923	0.087
第三节长	6.80	9.70	8.770	0.839	0.00	9.10	7.250	2.984
第三节粗	0.42	0.55	0.508	0.038	0.00	0.53	0.436	0.177
第三节茎秆鲜重	0.73	1.27	1.108	0.158	0.00	1.09	0.856	0.352
第四节长	5.80	8.20	7.090	0.725	5.50	8.20	6.500	1.094
第四节粗	0.40	0.52	0.487	0.047	0.41	0.53	0.479	0.042
第四节茎秆鲜重	0.86	1.36	1.158	0.172	0.71	1.29	0.930	0.191
第五节长	0.90	7.80	3.580	2.275	3.10	7.40	5.238	1.641
第五节粗	0.38	0.55	0.454	0.061	0.38	0.52	0.451	0.059
第五节茎秆鲜重	0.13	1.00	0.527	0.336	0.40	1.33	0.866	0.360
穗长	7.90	9.00	8.480	0.361	8.20	9.90	8.875	0.607
穗鲜重	2.42	2.76	2.603	0.110	2.45	2.96	2.653	0.182
株高	59.30	69.10	64.820	3.454	61.80	72.50	66.013	3.541
	2.75				2.92			
	最小值	最大值	均值	标准差	最小值	最大值	均值	标准差
第一节长	25.50	37.80	29.517	4.486	19.10	32.00	28.871	3.162

第一节粗	0.28	0.40	0.332	0.044	0.21	0.60	0.357	0.107
第一节茎秆鲜重	0.89	1.62	1.135	0.283	0.68	2.77	1.782	0.553
第二节长	13.90	18.20	16.750	1.529	13.60	18.00	15.653	1.293
第二节粗	0.44	0.52	0.475	0.033	0.55	0.93	0.737	0.121
第二节茎秆鲜重	0.81	1.12	0.995	0.122	1.19	2.04	1.718	0.252
第三节长	7.50	10.60	9.083	1.107	9.30	13.30	11.694	1.088
第三节粗	0.42	0.54	0.487	0.042	0.70	0.91	0.808	0.058
第三节茎秆鲜重	0.91	1.09	1.030	0.076	1.88	2.97	2.334	0.269
第四节长	6.10	6.50	6.333	0.137	7.00	11.00	9.024	1.035
第四节粗	0.38	0.49	0.445	0.039	0.60	0.82	0.713	0.058
第四节茎秆鲜重	0.79	1.14	1.000	0.117	1.57	2.64	2.147	0.262
第五节长	1.20	5.80	3.200	1.802	4.00	7.50	5.659	1.020
第五节粗	0.30	0.48	0.382	0.070	0.50	0.65	0.595	0.040
第五节茎秆鲜重	0.13	0.93	0.487	0.308	0.93	1.93	1.423	0.259
穗长	8.00	9.70	8.867	0.656	12.00	18.30	14.741	1.674
穗鲜重	1.85	3.15	2.752	0.471	2.48	3.78	3.046	0.345
株高	67.50	94.80	75.200	10.359	79.80	93.10	88.729	3.835

表19显示，对于单穗重1.91g的小麦，理想的五节茎秆长分别为33.955、19.736、11.400、6.755、5.600，理想的五节茎秆粗分别为0.333、0.377、0.464、0.417、0.388，理想的五节茎秆的鲜重分别为1.366、0.880、1.041、0.864、0.675，理想穗长为8.991，理想穗鲜重为2.085，理想株高为86.436。

对于单穗重2.06g的小麦，理想的五节茎秆长分别为25.600、15.960、10.100、8.220、7.620，理想的五节茎秆粗分别为0.322、0.262、0.420、0.394、0.426，理想的五节茎秆的鲜重分别为0.962、0.724、0.934、0.930、1.054，理想穗长为8.760，理想穗鲜重为2.314，理想株高为76.260。

对于单穗重2.46g的小麦，理想的五节茎秆长分别为22.690、14.210、8.770、7.090、3.580，理想的五节茎秆粗分别为0.336、0.512、0.508、0.487、0.454，理想的五节茎秆的鲜重分别为0.978、0.992、1.108、1.158、0.524，理想穗长为8.480，理想穗鲜重为2.603，理想株高为64.820。

对于单穗重2.56g的小麦，理想的五节茎秆长分别为24.363、13.788、7.250、6.500、5.238，理想的五节茎秆粗分别为0.376、0.488、0.436、0.479、0.451，理想的五节茎秆的鲜重分别为1.044、0.923、0.856、0.930、0.866，理想穗长为8.875，理想穗鲜重为2.653，理想株高为66.013。

对于单穗重2.75g的小麦，理想的五节茎秆长分别为29.517、16.750、9.083、6.333、3.200，理想的五节茎秆粗分别为0.332、0.475、0.487、0.445、0.382，理想的五节茎秆的鲜重分别为1.135、0.995、1.030、1.000、0.487，理想穗长为8.867，理想穗鲜重为2.752，理想株高为75.200。

对于单穗重2.92g的小麦，理想的五节茎秆长分别为28.871、15.653、11.694、9.024、5.659，理想的五节茎秆粗分别为0.357、0.737、0.808、0.713、0.595，理想的五节茎秆的鲜重分别为1.782、1.718、2.334、2.147、1.423，理想穗长为14.741，理想穗鲜重为3.046，理想株高为88.729。

六种单穗重小麦各节长和粗的理想值的直观图可见图3：

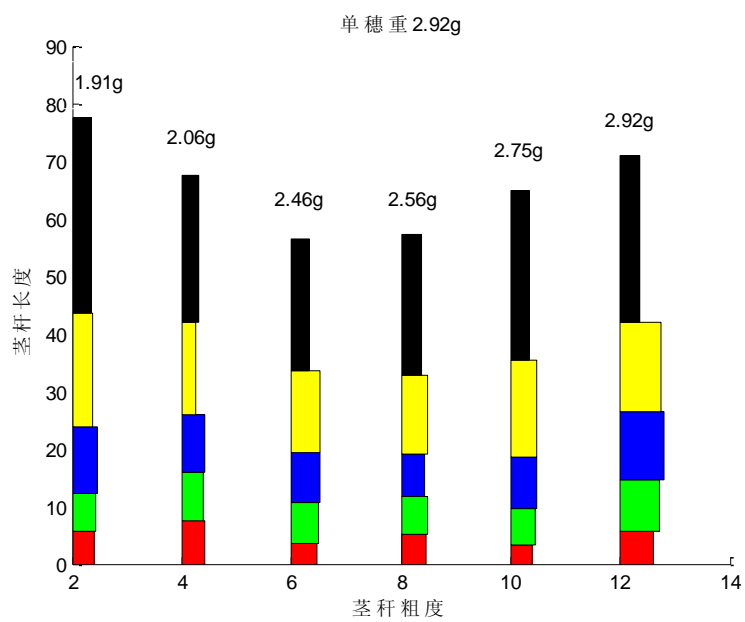


图 3 六种单穗重小麦各节长和粗理想值分布图

5 问题四解答

——建立小麦茎秆抗倒伏的数学模型

5.1 问题的分析

该节将小麦茎秆按刚/弹性材料处理,推导其在麦穗自重和风载作用下应力的基本规律,建立出小麦茎秆抗倒伏模型。模型从如下角度着手:

1、实际中,小麦茎秆是具有弹性可弯折的弹性材料,而不同于木棍等刚性材料,因此建立模型时将茎秆作为弹性材料来处理。

2、小麦茎秆无论在麦穗自重还是风载作用下的运动轨迹都不是单方向,即其速度矢量不是单一方向,固考虑从能量角度分析,从而避免了矢量方向不确定性。

3、为便于计算,假设在无风时,茎秆只受麦穗自重作用,而有风时,茎秆同时受麦穗自重和风载作用,因此问题四中提出的茎秆在自重、风载作用下的应力规律可理解为茎秆在自重作用、自重与风载共同作用下的应力规律。

4、在自重和风载共同作用下,小麦茎秆的倒伏过程可以从两个角度分析:第一个是倒伏瞬间,此时的瞬间速度为零,即到达茎秆的弯曲极限,这将通过静态模型进行分析;同时,从初始近似垂直处的稳态到达最终的倒伏瞬间过程中,小麦茎秆在作一个复杂的非线性运动,这将通过动态模型进行分析。

5、在上述第4个分析中的静态模型中,将推导得出茎秆能够承受的最大临界力;同时,在第4个分析中的动态模型中,将推导仿真出茎秆在整个倒伏过程中的运动轨迹。最后将两种模型分析相结合,共同组成小麦茎秆抗倒伏的数学模型。

5.2 考虑的因素

1、麦穗自重。作物茎秆通常可视为直线生长,在小麦的生长过程中,随着麦穗重量的增加,在其它环境因素影响较小时,会导致茎秆的直线生长变成弯曲生长,使稳定平衡进入不稳定平衡,即进入倒伏的临界平衡状态。这里为了方便模型的计算,假设麦穗的重量集中于麦穗重心上。

2、风力。风是重要的植物生态因子,风间接地或者直接地影响作物的生长和发育,在农业生产上具有重要的意义。在小麦生长过程中,风是影响茎秆倒伏的主要外在因素,实际生活中风是典型的随机因素,每时每刻都在变化,这里为了简化模型,认为风一次作用在茎秆和麦穗上的作用力大小不变。

3、风载方向和风载作用点。不同的风载方向以及不同的风载作用点情况下,茎秆的运动状态完全不同,如果逐一分析不同风载方向及作用点,将耗费大量时间,并且无明显意义,因此在本文中,将假设风载方向不变,保持水平方向,同时风载作用点也固定,为穗的最大迎风面。

4、弹性变形能(应变能)。把茎秆看成弹性材料处理时,在外力作用下茎秆会发生弹性变形,在茎秆倒伏之前即在弹性范围内都看作是能量守恒状态,假设外力做的功全部转化成茎秆的应变能,这也是茎秆在发生了弹性形变后所储存的能量。

5、静态和动态两种状态。茎秆在穗重和风力作用下,会出现相对静态和动态两种状态,因此需要对两种状态分别建立模型。静态过程是指仅在麦穗自重作用下,茎秆达到一种稳定平衡状态;动态过程是指在外加风力作用下,茎秆在自重和风载共同作用下形成的一种从竖直平衡位置到弯曲临界位置的运动过程,如转动角加速度、挠度等。

5.3 小麦茎秆抗倒伏模型的建立

在上述分析基础上，分别对倒伏瞬间的静态和倒伏的动态过程建模，最终建立了三个模型，分别为：自重作用下的静态模型、自重与风载共同作用下的静态模型、自重与风载共同作用下的动态模型。其中，在建立静态模型时，分别以临界力、最终弯曲跨度为计算目标，建立了两种模型，最终结合模型结果和模型中相关参数的实际测量难易程度，选择了一种最佳的静态模型。

1、模型假设：

(1) 因腊熟期小麦叶片、叶鞘多已脱落，设风力仅对单穗穗头起作用，暂时忽略风力对小麦茎秆作用，并且假设风力始终垂直于麦穗的侧面。

(2) 小麦茎秆横截面是圆形结构，在此横截面内存在一个中性轴，在位于圆形横截面中载荷的作用下，中性轴既不伸长又不缩短。

(3) 小麦茎秆未变形时，垂直于中性轴的横截面是一个平面；茎秆变形后仍保持平面且垂直于中性轴。

(4) 小麦茎秆上各点的横向位移在对称平面内，取对称平面内坐标轴（图 4）；

(5) 小麦茎秆材料均匀、连续、各方向性质一致，服从胡克定律。

2、符号说明：

符号	说明	符号	说明	符号	说明
l	茎高(mm)	H	株高 (mm)	t	茎秆壁厚(mm)
E	茎秆弹性模量(GPa)	y	横向位移 (mm)	$I(x)$	茎秆截面惯性矩(mm^4)
p_w	作用于茎秆上恒定风载荷(N)	D	茎秆外茎 (mm)	m_2	麦穗的质量 (g)

5.3.1 静态模型建立

1、穗自重单独作用

(1) 以最终弯曲跨度为计算目标

如图 4 所示为茎秆在穗自重作用下发生弯曲的等效示意图，在麦穗自重作用下时，茎秆受到轴向方向的作用力，从而发生弹性变形，这里假设变形比较微小，因此变形后的弧长近似认为跟原长一样，如图中坐标系所示，竖直方向上位移满足勾股定理（式（16））。另一方面在这个过程中满足机械守恒定理^[6]，麦穗重力做功的能量转化成茎秆的应变能（式（13））。

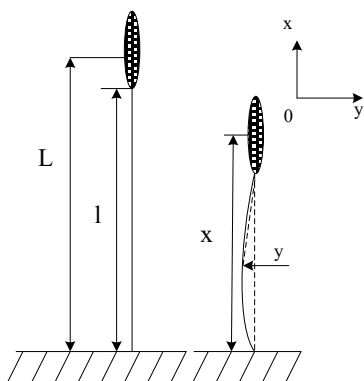


图 4 茎秆在穗重作用下的力学模型

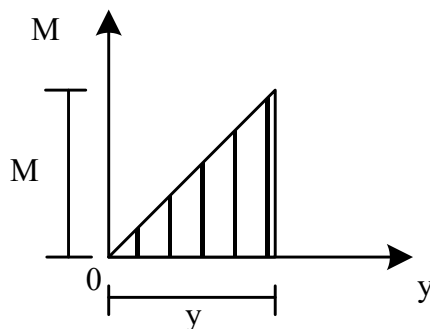


图 5 M_e 与横向位移 y 成线性关系

由于发生弹性变形而储存的能量称为弹性变形能（应变能），且在弹性范围内，认为构件受静载外力产生变形的过程中是能量守恒的，即外力功=变形能。根据材料力学知识，可得应变能的计算公式，如下所示：

$$V_\varepsilon = \frac{M_e^2 x}{2EI} \quad (11)$$

其中 M_e 为弹性力矩， $M_e = My$ ， M 为随弯曲程度变化的弹性力，这里假设 M 与横向位移 y 成线性关系（图 5），即 $M = ky$ ， k 是与茎秆材料有关的常量，故 $M_e = ky^2$ 可以通过实验测得。

用三点弯曲试验测定弹性模量 E ，根据材料力学知识^[7]，得到茎秆弹性模量 E 公式为

$$E = \frac{wl^3}{48yI} \quad (12)$$

茎秆截面惯性距为 $I = \frac{\pi}{64}[D^4 - (D-2t)^4]$ 。

$$\begin{cases} m_2 g(L-x) = \frac{(M_e)^2 x}{2EI} \\ E = \frac{m_2 g x^3}{48yI} \\ I = \frac{\pi}{64}[D^4 - (D-2t)^4] \\ \left(\frac{x}{2}\right)^2 + y^2 = \left(\frac{H}{2}\right)^2 \end{cases} \quad (13) \sim (16)$$

其中 L 是麦穗重心到地面的距离，定义为

$$L = l + \frac{H-l}{2} = \frac{H+l}{2} \quad (17)$$

根据以上公式便可以得到茎秆在麦穗自重作用下的数学模型（式（13）），并且这是理想状态下的模型（忽略了环境等因素的影响）。

（2）以临界力为计算目标

如图 6 所示，当穗重单独作用时，茎秆在临界稳定状态处受到微小扰动后，从原来的竖直平衡位置变到微弯的平衡形式。

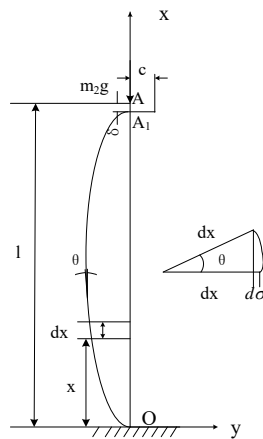


图 6 穗重作用下的茎秆的力学模型

当穗重单独作用时，茎秆在临界稳定状态处受到微小扰动后，从原来的竖直平衡位置变到微弯的平衡形式。首先分析茎秆在穗重作用下的力学模型（图 4），进行数学模型的建立。

假设微弯时的挠曲线 OA_1 的方程为 $y = f(x)$ ，此时茎秆内增加了弯曲应变能，其数值与挠曲线形状有关。但因均匀压应力的直线状态与微弯状态没有改变，所以茎秆的压缩应变能并不变化，则 OA_1 曲线长度与 OA 直线长度近似相等。在变弯的过程中，麦穗重力 m_2g 的作用点发生了小位移 $\Delta s = AA_1$ ，则 G 做功 $m_2g\Delta s$ ，此功等于茎秆的弯曲应变能 U ，即：

$$m_2g\Delta s = U \quad (18)$$

先求 Δs ，可从茎秆的原长 l 与弯曲后杆的挠曲线在 x 轴投影长度之差求得：

$$d\Delta s = dx - dx \cos \theta \approx \frac{\theta^2}{2} dx \quad (19)$$

同时

$$\theta = \frac{dy}{dx} = y' \quad (20)$$

所以

$$\Delta s = \frac{1}{2} \int_0^l (y')^2 dx \quad (21)$$

茎秆在弯曲时的应变能为：

$$U = \int \frac{M^2 dx}{2EI} = \frac{1}{2} \int_0^l EI (y'')^2 dx \quad (22)$$

综上，可得：

$$\frac{1}{2} \int_0^l EI (y'')^2 dx = m_2g \cdot \frac{1}{2} \int_0^l (y')^2 dx \quad (23)$$

临界状态时的压力即为临界力，上式中 m_2g 用 P_{cr} 代替，得：

$$P_{cr} = m_2g = \frac{\int_0^l EI (y'')^2 dx}{\int_0^l (y')^2 dx} \quad (24)$$

一般情况下，杆的挠曲线方程是一个未知数，我们可以假设茎秆在微弯时的挠曲线方程为

$$y = f \sin \frac{\pi x}{l} \quad (25)$$

它满足边界条件 $x=0, y=0; x=l, y=0$ ，代入上式，得：

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{l^2} \quad (26)$$

考虑一般性情况，假设在未达到倒伏状态时的茎秆应力 P ：

$$P = m_2g = \frac{\pi^2 EI}{l^2} = 9.8596 \frac{EI}{l^2} \quad (27)$$

由上式可以看出，对于任一小麦植株，测得其在无风载作用的穗重 m_2g 和株高 l ，便可求出该植株的抗弯刚度 EI 。

通过两个静态模型的建立，发现以临界力为计算目标的静态模型，只需测量穗自重

和穗重单独作用下得茎秆高度，即能计算出茎秆的抗弯刚度 EI ，并且其需要的参数穗重 m_2g 和株高 l 测量简便；以最终弯曲跨度为计算目标下的静态模型需要在倒伏瞬间时的弯曲高度，而该指标在实际测量上非常困难。因此选择了以临界力为计算目标的静态模型作为穗自重作用下的静态模型。

2、穗自重与风载共同作用

在穗自重和风载共同作用下，将茎秆的运动分解为穗自重作用下和风载作用下。穗自重作用下的静态分析如式所示，下面分析在风载作用下的静态模型。

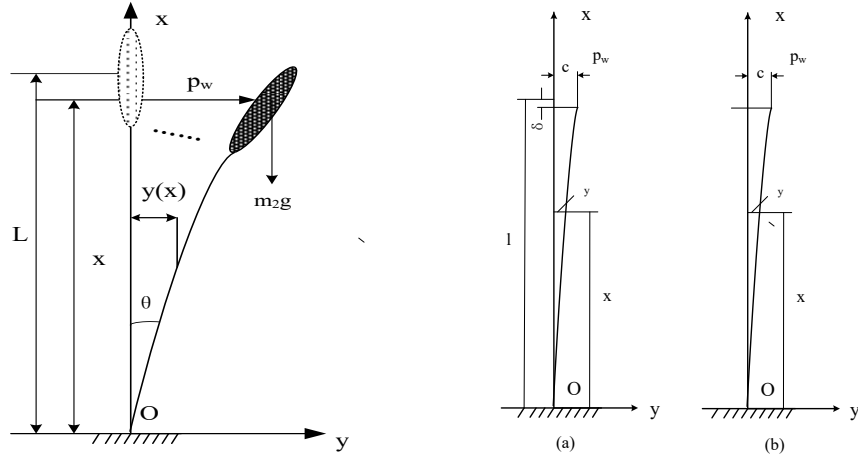


图 7 穗自重与风载共同作用下的茎秆弯曲示意图

如图 7 所示，在风力作用时，茎秆在风载下，从原来的竖直平衡位置变到弯曲的平衡形式。

假设风载始终保持水平方向，并且风载仅作用于麦穗，即作用点为茎秆顶端。一般情况下，茎秆的挠曲线方程作为一个未知数，可以假设或选择一个函数，只需能满足茎秆的边界条件。此时，对于茎秆，风力作用为剪切力，其挠曲线方程与在自重作用下的挠曲线方程不同，假设茎秆的挠曲线方程^[8]为：

$$y = f(x) = \frac{P_w x^2}{6EI} (3l - x) \quad (28)$$

令
$$c = y(l) = \frac{P_w l^2}{3EI}$$

代入上式可得：

$$y = \frac{c}{2l^3} x^2 (3l - x) \quad (29)$$

杆的弯曲应变能：

$$\begin{aligned} U &= \int_0^l \frac{M^2(x) dx}{2EI} = \int_0^l \frac{[P_w(c - y)]^2 dx}{2EI} \\ &= \frac{P_w^2}{2EI} \int_0^l (c - y)^2 dx \end{aligned} \quad (30)$$

代入 y ，并求积分得：

$$U = \frac{P_w^2 c^2}{2EI} \times \frac{17}{35} l \quad (31)$$

外力 P 的位移：

$$\begin{aligned}
\delta &= \frac{1}{2} \int_0^l (y')^2 dx \\
&= \frac{1}{2} \int_0^l \left[\frac{3c}{2l^3} (2lx - x^2) \right]^2 dx \\
&= \frac{3}{5} \frac{c^2}{l}
\end{aligned} \tag{32}$$

在临界状态下:

$$\begin{cases} P_w = P_{cr} \\ W_w = U \end{cases}$$

即: 外力等于临界力, 且外力功等于应变能。
因此,

$$P_{cr} \times \frac{3}{5} \frac{c^2}{l} = \frac{P_{cr}^2 c^2}{2EI} \times \frac{17}{35} l \tag{33}$$

进一步可得:

$$P_{cr} = 2.4706 \frac{EI}{l^2} \tag{34}$$

此时, 将穗自重下的临界力矢量与风载作用下的临界力矢量进行矢量合成, 由式和式可得到在自重与风载共同作用下的临界力 $P_{cr\text{合}}$:

$$\begin{aligned}
P_{cr\text{合}} &= \sqrt{\left(9.8596 \frac{EI}{l^2}\right)^2 + \left(2.4706 \frac{EI}{l^2}\right)^2} \\
&= 10.1644 \frac{EI}{l^2}
\end{aligned} \tag{35}$$

5.3.2 动态模型建立

如图 8 所示, 小麦植株在穗自重和风载作用下摆动的动态过程, 可以等效为在水平方向上的端部带集中质量的弹性梁。设茎秆秆体的密度为 ρ , 穗的质量为 m_2 , 茎秆的质量为 M 。

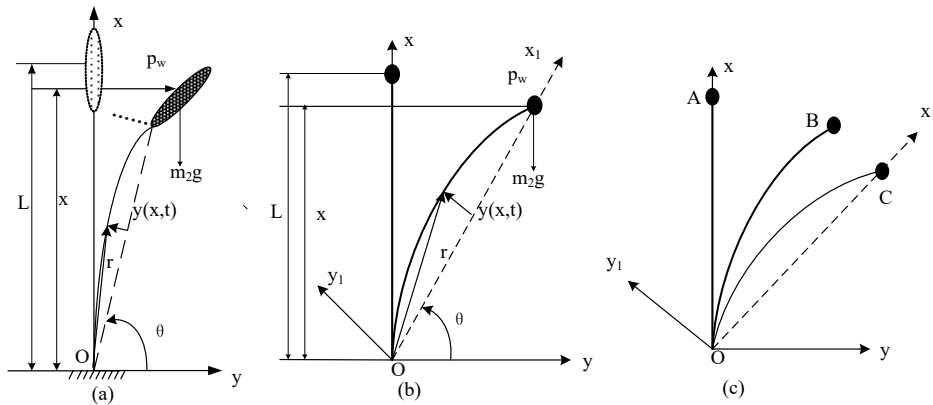


图 8 茎秆动态模型等效及运动过程

1、运动过程分析

如图 8 (c) 所示, 取茎秆摆动过程中的三个点 A、B、C 点, A 点为初始点, 可以看出此时的运动为零, 但是在风载作用下, 加速度最大; 从 A 点到 B 点过程中, 风载恒定, 而茎秆应力增大, 茎秆做加速度减小的加速运动, 到达 B 点处, 假设此时加速度

刚好为零；越过 B 点到达 C 点的过程，由于茎秆应力依然增大，此时茎秆做加速度增大的减速运动，最终在 C 点处停止，也即上一小节分析的静态，但茎秆在未倒伏时，不会在 C 点处停留，而会在茎秆应力作用下回摆，依旧做加速度不断变化的变加速运动。

2、动力学模型建立

根据运动过程分析，茎秆的摆动过程中的速度矢量大小方向时刻变化，因此选择从能量角度建立方程。在运动过程中，系统能量包含动能、风能、重力、势能和茎秆发生弹变的弹性能。其中动能包含有平动动能 $T_{\text{平}}$ 和转动动能 $T_{\text{转}}$ 两种，其计算公式如下：

$$T_{\text{平}} = \frac{1}{6} ML^2 \theta'^2 + \frac{1}{2} \int_0^L \rho A (y'^2 + 2xy''^2 \theta + y^2 \theta'^2) dx + \frac{1}{2} m_2 [y'^2 + 2Ly' \theta' + v^2 \theta'^2 + L^2 \theta'^2] \quad (36)$$

$$T_{\text{转}} = \frac{1}{2} Mr^2 \theta'^2 + \frac{1}{2} \rho I \int_0^L (y'^2 + y'^2 \theta'^2) dx + \rho I \theta' \int_0^L (y'j - y' \theta' i) dx + \frac{1}{2} J_{m_2} [y' + \theta']^2 \quad (37)$$

变形能计算公式为：

$$U = \frac{1}{2} \int_0^L EI (y'')^2 dx \quad (38)$$

令挠曲线方程为：

$$y = \sum_{n=1}^{\infty} \sin\left(\frac{n\pi x}{L}\right) q_n(t) \quad (39)$$

满足边界条件。为便于计算，取前二阶模态，则挠曲线方程

$$y = \sin\left(\frac{\pi x}{L}\right) q_1(t) + \sin\left(\frac{2\pi x}{L}\right) q_2(t) \quad (40)$$

带入上述三式得：

$$T_{\text{平}} = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{3} M + m_2 \right) L^2 \theta'^2 + \frac{1}{4} M \theta' (q_1'^2 + q_2'^2) + \frac{1}{4} M (q_1'^2 + q_2'^2) + M \theta' \left(\frac{L}{\pi} q_1' + \frac{L}{\pi} q_2' \right) \quad (41)$$

$$T_{\text{转}} = \frac{1}{2} (Mr^2 + J_{m_2}) \theta'^2 + \frac{1}{4} M \left(\frac{\pi}{L} \right)^2 (q_1'^2 + q_2'^2) + \frac{1}{4} M \theta'^2 \left(\frac{\pi}{L} \right)^2 (q_1'^2 + 4q_2'^2) \\ + \frac{1}{2} J_{m_2} \left(\frac{\pi}{L} \right)^2 (q_1'^2 + 4q_2'^2 - 4q_1' q_2') + J_{m_2} \left(\frac{\pi}{L} \right) (q_1' - 2q_2') \theta'$$

$$U = \frac{1}{4} EI \frac{\pi^4}{L^3} q_1'^2 + \frac{1}{4} EI \frac{(2\pi)^4}{L^3} q_2'^2 \quad (42)$$

根据拉格朗日函数： $L = T_{\text{平}} + T_{\text{转}} - U$ ，得到茎秆摆动过程动力学模型：

$$\left\{ \begin{aligned} & \{M[\frac{1}{3}L^2 + r^2 + \frac{1}{2}(1 + (\frac{\pi r}{L})^2)q_1'^2 + \frac{1}{2}(1 + (\frac{2\pi r}{L})^2)q_2'^2] + m_2L^2 + J_{m_2}\} \theta'' + (\frac{ML}{\pi} + J_{m_2} \frac{\pi}{L}) q_1'' \\ & - (\frac{ML}{2\pi} + 2J_{m_2} \frac{\pi}{L}) q_2'' + M \theta' \{[1 + (\frac{\pi r}{L})^2] q_1 q_1' + [1 + (\frac{\pi r}{L})^2] q_2 q_2'\} = W \\ & (\frac{ML}{\pi} + J_{m_2} \frac{\pi}{L}) \theta'' + \{\frac{1}{2} M [1 + (\frac{\pi r}{L})^2] + J_{m_2} (\frac{\pi}{L})^2\} q_1'' - J_{m_2} (\frac{\pi}{L})^2 q_2'' + \frac{1}{2} \{EI \frac{\pi^4}{L^3} - M \theta'^2 \\ & [1 + (\frac{\pi r}{L})^2]\} q_1 = \frac{\pi}{L} W \\ & - (\frac{ML}{2\pi} + J_{m_2} \frac{2\pi}{L}) \theta'' - 2J_{m_2} (\frac{\pi}{L})^2 q_1'' + M \theta' \{[1 + (\frac{\pi r}{L})^2] q_1 q_1' + \{\frac{1}{2} M [1 + (\frac{2\pi r}{L})^2] + 4J_{m_2} (\frac{\pi}{L})^2\} q_2'' \\ & + \frac{1}{2} \{16EI \frac{\pi^4}{L^3} - M \theta'^2 [1 + (\frac{2\pi r}{L})^2]\} q_2 = \frac{2\pi}{L} W \end{aligned} \right. \quad (43)$$

综合静态模型和动态模型，建立的小麦茎秆倒伏模型为：

$$\left\{ \begin{aligned}
& \{M[\frac{1}{3}L^2 + r^2 + \frac{1}{2}(1 + (\frac{\pi r}{L})^2)q_1'^2 + \frac{1}{2}(1 + (\frac{2\pi r}{L})^2)q_2'^2] + mL^2 + J_{m_2}\}\theta'' + (\frac{ML}{\pi} + J_{m_2}\frac{\pi}{L})q_1'' \\
& - (\frac{ML}{2\pi} + 2J_{m_2}\frac{\pi}{L})q_2'' + M\theta'\{[1 + (\frac{\pi r}{L})^2]q_1q_1' + [1 + (\frac{\pi r}{L})^2]q_2q_2'\} = W \\
& (\frac{ML}{\pi} + J_{m_2}\frac{\pi}{L})\theta'' + \{\frac{1}{2}M[1 + (\frac{\pi r}{L})^2] + J_{m_2}(\frac{\pi}{L})^2\}q_1'' - J_{m_2}(\frac{\pi}{L})^2q_2'' + \frac{1}{2}\{EI\frac{\pi^4}{L^3} - M\theta'^2 \\
& [1 + (\frac{\pi r}{L})^2]\}q_1 = \frac{\pi}{L}W \\
& - (\frac{ML}{2\pi} + J_{m_2}\frac{2\pi}{L})\theta'' - 2J_{m_2}(\frac{\pi}{L})^2\}q_1'' + M\theta'\{[1 + (\frac{\pi r}{L})^2]q_1q_1' + \{\frac{1}{2}M[1 + (\frac{2\pi r}{L})^2] + 4J_{m_2}(\frac{\pi}{L})^2\}q_2'' \\
& + \frac{1}{2}\{16EI\frac{\pi^4}{L^3} - M\theta'^2[1 + (\frac{2\pi r}{L})^2]\}q_2 = \frac{2\pi}{L}W
\end{aligned} \right. \quad (44)$$

$$\begin{aligned}
P_{cr\hat{\cap}} &= \sqrt{(9.8596\frac{EI}{l^2})^2 + (2.4706\frac{EI}{l^2})^2} \\
&= 10.1644\frac{EI}{l^2}
\end{aligned} \quad (45)$$

6 问题五解答

——小麦茎秆抗倒伏数学模型的求解

6.1 问题五的分析

应用问题四中建立的力学模型中的抗弯刚度 EI ，麦穗自重下和风载作用下的公式对 2007 年腊熟期各品种数据进行计算。分析如下：

1、根据 2007 年提供的数据，求解问题四建立的抗倒伏模型，得到抗弯刚度 EI 、在一定风速下摆动的运动轨迹、摆动角度等结果。

2、根据极限弯折曲度，通过问题四建立的抗倒伏模型，计算出对应植株所能承受的极限风速，即抗倒伏风速。

3、由于植株在自重和风载共同作用下的做非线性运动，可以看做典型的非线性弹性动力系统，因此在建立其抗倒伏模型的基础上，应当结合非线性动力学分析原理，初步分析其在运动过程中可能发生的混沌现象（系统运动的不确定性），找出可能导致混沌的相关特性参数，如质量、高度和风载特性等。

4、最后，由于问题四建立的是小麦茎秆的抗倒伏模型，因此计算出的结果在一定程度上应当能评价小麦茎秆的抗倒伏能力。

6.2 数据处理

问题四中建立的抗倒伏模型需要以下指标的数据：

1、穗鲜重、株长、茎高、茎秆鲜重，这些指标数据在问题一中已求出；

2、穗转动惯量 J_m ：

$$J_m = \frac{2}{3}ml^2 \quad (46)$$

3、茎秆密度 ρ ：

$$m_1 = \frac{1}{4}\rho\pi[D^2 - (D - 2t)^2]l \quad (47)$$

4、穗头迎风面积在腊熟期，小麦穗头迎风面积与穗重有一定关系。可假定单穗鲜重与穗头迎风面积的关系为：

$$\text{穗头迎风面积} = a + b \times \text{单穗鲜重}$$

其中 a ， b 为转换系数， $a=0.4841$ ， $b=0.2238$ 。面积单位为 cm^2 ，单穗鲜重单位为 g 。

根据以上数据整理和计算，得到了穗迎风面积、茎秆密度、茎秆长、茎秆粗、茎秆壁厚、弹性模量、穗鲜重、穗转动惯量、茎秆鲜重和茎秆截面惯性矩十个指标数据（各品种的平均值见表 20，具体数据见附件二）。

表 20 07 年矮 58、新麦 208、周麦 18 各样本的物理量计算结果

	穗迎风面积 cm^2	密度 kg/m^3	茎秆长 cm	茎秆粗 cm	茎秆壁厚 cm
矮 58	0.567	1071.67	71.18922	0.247895	0.05
新麦 208	0.527	1663.895	79.06	0.223438	0.03
周麦 18	0.465	1124.362	80.24267	0.21625	0.04
	弹性模量 GPa	穗鲜重 g	穗转动惯量 $10^{-7} kg \cdot m^2$	茎秆鲜重 g	茎秆截面惯性 矩 mm^4
矮 58	1008.867	2.972721	2.75152	5.232015789	1.736712335
新麦 208	2059.009	2.764488	2.90867	4.8655125	0.884788077
周麦 18	2086.963	2.440217	1.40453	4.294783333	0.970971796

6.3 问题四模型的求解

6.3.1 穗自重单独作用下的静态模型求解

根据问题四建立的穗自重单独作用下的静态模型（参见式（27）），代入上述得到的每个品种的穗鲜重和株长，求出各品种的对检测样本的抗弯刚度 EI 。

表 21 07 年矮 58、新麦 208、周麦 18 各样本的抗弯刚度 EI 单位: $N \cdot mm^2$

样品	矮抗 58	新麦 208	周麦 18
1	1863.253	1631.119	1803.994
2	1195.802	1882.034	1259.114
3	1530.355	1963.885	1296.584
4	1255.017	1867.424	1558.522
5	1764.076	1675.470	2141.341
6	1508.554	2061.767	1525.414
7	1261.856	1311.639	
8	1005.288	1682.278	
9	1925.577		
10	1511.055		
11	1672.62		
12	1788.641		
13	2000.185		
14	1221.053		
15	1508.094		
16	1861.619		
17	1165.672		
18	1604.342		
19	1518.343		
平均值	1534.811	1759.452	1597.495

根据表 21 的计算结果，矮抗 58、新买 208 和周麦 18 三个品种的 EI 平均值分别为 1534.811、1759.452 和 1597.495。可以看出：新麦 208 品种的抗弯刚度最大，矮抗 58 的抗弯刚度最小。

6.3.2 在穗自重与风载共同作用下的静态模型求解

根据问题四建立的在穗自重与风载共同作用下的静态模型（参见式（35）），将矮 58、新麦 208、周麦 18 的各参数平均值代入该模型，可计算得到三种品种小麦的倒伏临界力和抗倒伏风速，计算结果如下：

表 22 矮抗 58、新麦 208、周麦 18 的倒伏临界力、抗倒伏风速

品种	倒伏临界力（ N ）	抗倒伏风速（ m/s^2 ）
矮抗 58	0.0075	21.5608
新麦 208	0.0069	21.3416
周麦 18	0.00612	21.4529

表 22 显示：三种品种小麦的倒伏临界力大小分别为矮抗 58>新麦 208>周麦 18，三种品种小麦的抗倒伏风速大小分别为矮抗 58>周麦 18>新麦 208。当风速达到 $21.3416m/s^2$ 时，新麦 208 品种小麦最先达到倒伏临界力，出现倒伏，而其他两个小麦品种并不发生倒伏。从抗倒伏风速数据上显示出，三种品种抗倒伏能力大小是矮抗 58>周麦 18>新麦 208，该结论与问题一根据倒伏指数对三种品种抗倒伏能力的判断结果一致，进一步说明问题四建立的模型合理有效。

6.3.3 动态模型求解与仿真

根据问题四建立的动态模型，利用 Matlab/Simulink 建立植株倒伏过程的非线性动力系统，系统如图 9：

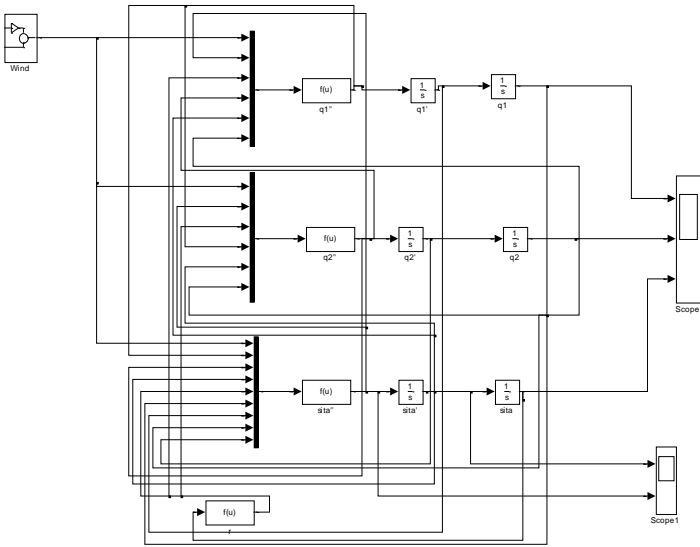


图 9 动态模型系统图

将表 20 求得的各指标数据，代入到问题四建立的动态模型（参见式（43）），分别对矮 58、新麦 208、周麦 18 三种品种小麦在不同风载下，随风摆动的动态过程，观察了挠曲线方程的一阶模态、二阶模态、偏移角度和偏移角加速度的变化过程。

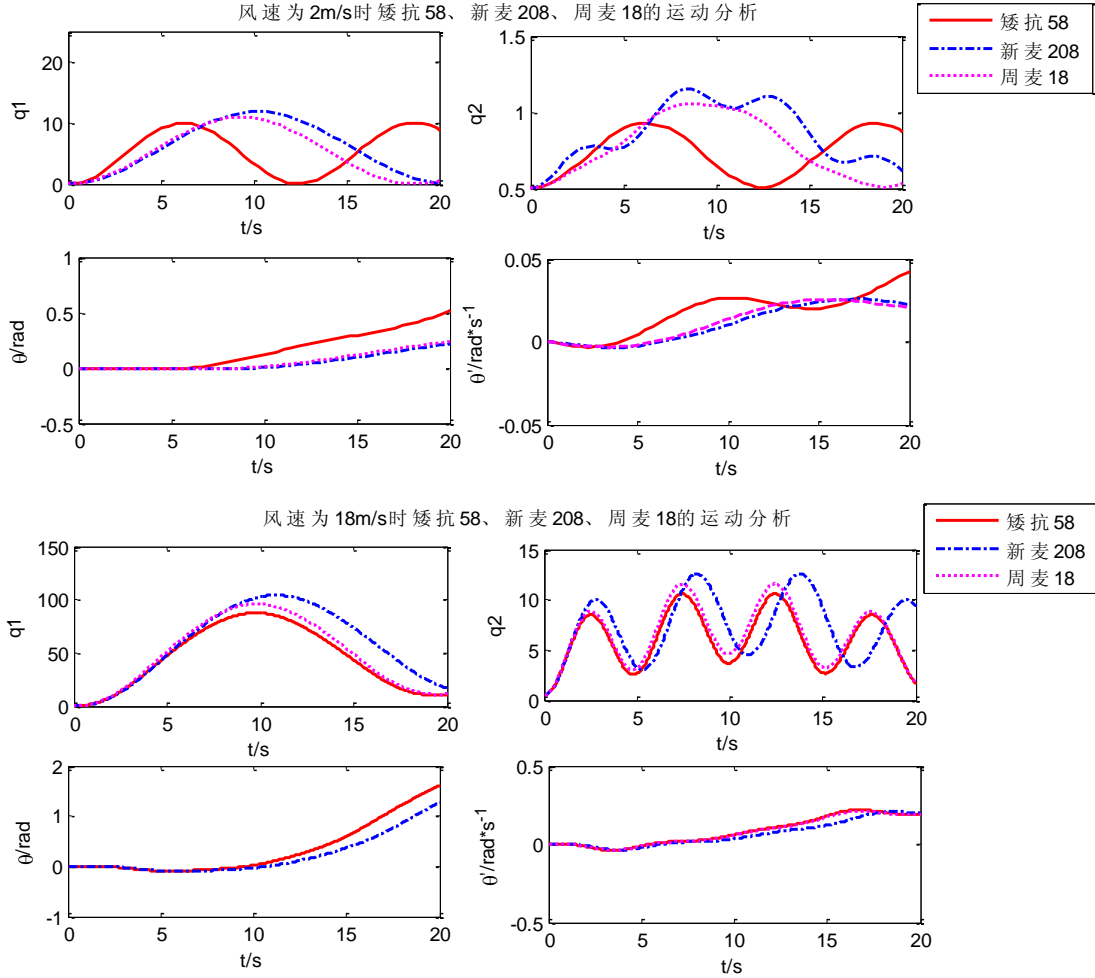


图 10 不同风速挠曲线一阶模态、二阶模态、偏移角度和偏移角加速度的时序图

由图 10 可以看出，随着风速的增加，茎秆的摆动角度、摆动的角速度呈增加趋势，符合实际情况；在固定风速下，通过摆动角速度的变化曲线，可以看出茎秆在做加速度减小的加速与加速度增大的减速交替进行的运动，符合问题四中的运动过程分析；对比不同风速下的各品种的摆动角度发现，在低风速时，小麦的摆动角度主要受茎秆本身物理特性（不同小麦品种的茎秆特征）影响，而当风速很大时，茎秆本身物理特性与风力影响相比作用非常弱，即无论哪一品种均会发生倾倒，这也符合实际情况。

6.4 倒伏过程的非线性动力学分析

对于线性动力系统，对系统施加确定性的输入，该系统的输出必然确定，而对于非线性系统则不然，系统可能发生一种无法精确重复的、貌似随机的运动，即为混沌运动^[8]。实际生活中，穗重随时间会发生变化、风速的不确定性、虫鸟等外来偶然干扰等带来了各种不确定性，因此小麦茎秆受风载作用的动力系统是典型的非线性系统，系统必然存在混沌现象。典型的混沌效应即为“蝴蝶效应”，即系统中某一参数的细微变化可能会造成整个系统崩溃，小麦在风载作用下，如果在某一时刻发生混沌现象，传统的确定性动力学分析将失效，此时极有可能因为混沌运动而造成倒伏，因此对该非线性动力系统进行混沌分析是很有必要的。

因时间有限，仅以矮抗 58 为分析对象，假设其受到符合正弦规律的风载作用，即

$$v = v_{\max} \sin(2\pi f \cdot t) \quad (48)$$

其中 v 表示风速、 v_{\max} 表示最大风速、 f 表示风载变化频率。分析混沌运动常用方法有三种：系统相平面分析、系统分岔图、*Lyapunov* 指数。这里选择相平面分析进行定性分析。当 $v_{\max} = 15\text{m/s}$ 、 f 分别为 1Hz 、 10Hz 、 50Hz 、 100Hz 下系统的相平面图如下：

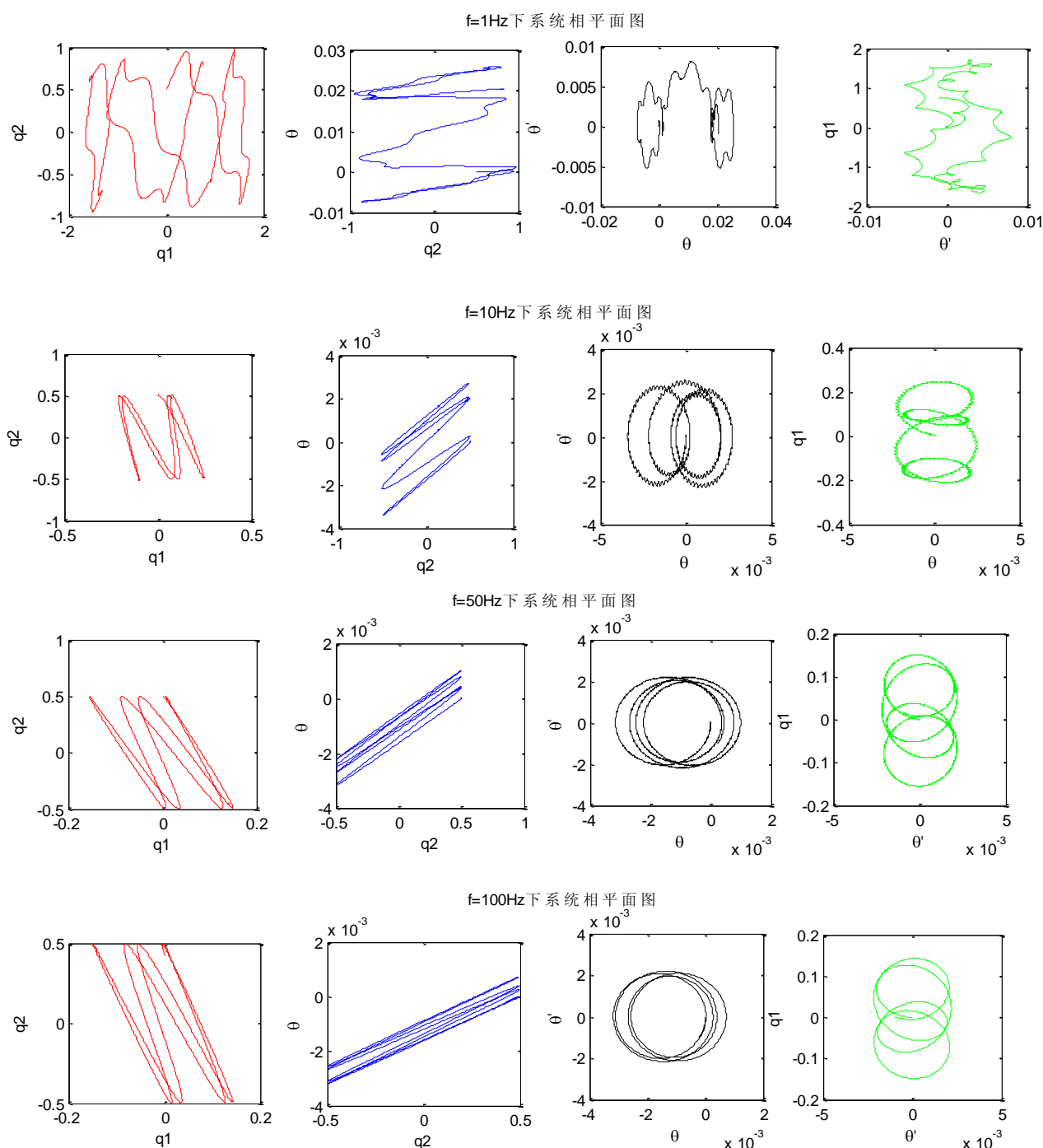


图 11 最大速度为 15m/s 时不同频率的系统相平面图

通过图示相平面图可以看出，在 1Hz 的风载频率下，系统相平面图呈杂乱状，说明系统发生了混沌现象，在 10Hz 的风载频率下，系统发生了倍周期分岔，而在 50Hz 和 100Hz 的风载频率下，系统相平面趋于不变，即进入了稳态，因此通过相平面定性分析，发现在一定最大风速下，随着风载频率的减小，系统进入了混沌区域。

7 问题六的解答

——总结模型和提出建议

7.1 模型总结及结果分析

1、问题一中基于提出的假设，估算出机械强度、茎秆鲜重和茎秆重心高度三个模型，从而计算得到各小麦品种的倒伏指数。从分析结果可以间接看出，估算的三个模型准确性较高。

2、问题二中建立各小麦品种及通用的倒伏指数与外部茎秆特征逐步回归模型，较好的反映出不同品种之间的共性和特性；问题二建立的 Logistic 判别模型，准确的找到了影响小麦发生倒伏的原因。

3、问题四分别建立了穗自重单独作用的静态模型、穗自重与风载共同作用的静态模型、穗自重与风载共同作用的动态模型，三个模型共同组成了小麦茎秆抗倒伏模型。

4、在穗自重单独作用的静态模型中，通过穗鲜重、小麦茎秆静态高度（株长）计算得到小麦茎秆的抗弯刚度 EI ，结果见表 21，与前人的实验测量结果进行比较，均在同一的数量级，证明了该模型正确。

5、在穗自重与风载共同作用的静态模型中，通过小麦茎秆的临界弯曲高度，同时结合已求出的茎秆抗弯刚度，计算出小麦茎秆的临界力，进一步根据贝努力公式计算出抗倒伏风速，结果见表 22。

6、在穗自重与风载共同作用的动态模型中，利用 Matlab/Simulink 建立模型的系统模型进行仿真分析，得到了模型下小麦茎秆的运动轨迹，如图 10，结合问题四中对运动过程的理论分析，发现两者吻合。

7.2 需考虑的问题及建议

1、在计算小麦茎秆倒伏指数时，由于实验测得的数据存在较多缺陷，甚至有些数据对计算倒伏指数没有作用，如茎秆各节的干重，各节晒干之后的粗等指标。这些指标应该在以后的实验中可以不测量。

2、在实验测量小麦茎秆外部特征数据时，应该注意到茎秆节数的分配比例，如应增加六节茎秆的小麦数，这样在分析中才能考虑到第六节茎秆对小麦倒伏的影响。

3、在问题五的分析中，对建立的动态模型进行了非线性动力学分析，得到系统的相平面图，如图 11，结果发现风载频率变化时，小麦茎秆的运动出现了混沌现象，而非线性系统中多种参数均有可能导致系统产生混沌，而混沌将会给非线性系统带来不可预料的后果，因此建议今后的小麦茎秆倒伏研究中，需要进行详细的非线性动力学分析，并最终设计对应的控制措施。

4、进行系统分析时，建立合理的系统输入模型很重要，对于小麦茎秆倒伏研究，即为风载输入，建议从两方面进行：一是对当地的风载进行测量统计，建立相应的风载随时间变化函数关系，建立不同时期的风载模型，便于理论研究；二是通过实验分析风载对小麦茎秆作用过程，例如研究风速与水平面不同夹角下的风载对小麦茎秆的作用，从而使风载作用更好的切合实际。

5、样本组成的不一致，指标的缺失，时间轴的不确定，不全面，力学测试太少，运动过程没有记录。

6、在提供的数据中，倒伏小麦的数据较少，而不倒伏小麦的数据较多，为了数据分析结果的说服力，可适当增加倒伏小麦的数据量。

7.3 2012 年的试验方案与数据分析方法

1、试验材料与方法

选择多品种，多倒伏特征的小麦进行全程时期的观察。

所有材料种植 2 行区，行长 1.5 m，行距 25 cm，株距 3 cm，人工点播，随机区组设计，三次重复。

2、测定项目及方法

分别于开花期（4 月 27 日）、灌浆期（5 月 6 日）、乳熟期（5 月 17 日）和蜡熟期（6 月 23 日）对 20 个材料进行测定三次，并对其中的 6 个材料从抽穗期开始每 5 天取样一次，至成熟期共测定 8 次，每小区每次取 10 个单茎进行测定。用直尺和游标卡尺分别测出节间长度和粗度，每次每个处理取 10 个单茎求平均值茎壁厚度。

根据问题五中提出的需要测试数据，制定出测试表格，供测试人员选择测定项目时使用，其中主要测定项目为穗迎风面积、株长、重心（含穗和不含穗）、茎秆机械强度、整节茎秆密度、整节茎秆长、茎秆粗、整节茎秆壁厚、弹性模量、穗鲜重、穗转动惯量、整节茎秆鲜重、整节茎秆截面惯性矩及各节茎秆密度、各节茎秆长、各节茎秆粗、各节茎秆壁厚、弹性模量、穗鲜重、穗转动惯量、各节茎秆鲜重、各节茎秆截面惯性矩。

主要数据测试方法如下：

（1）株高的测定

在完全无风环境下，首先固定含穗茎秆于垂直位置，然后缓慢放开麦穗，直到其最终小麦茎秆静止，此时，测量其穗尖到茎秆根部的距离即为株高。

（2）重心高度的测定

取完整的小麦地上部植株放于固定好的支架上，使其平衡，量取茎秆基部到平衡支点的距离即为小麦植株的重心高度。

（3）茎秆机械强度的测定

取新鲜茎秆基部第二节间中部 5 cm，放在固定好的支架上，用数字式测力仪的弹簧钩勾住支架上茎秆的中部，缓慢向下拉，直到将茎秆拉断为止，这时拉力计上保留最大的拉力值，并记下读数。

（4）涉及的长度、粗度等的测定

涉及到长度、粗度和厚度的测量，一律采用游标卡尺或高精度标度尺测量。

测试项目	样本一	样本二	样本三	样本四	样本 <i>n</i>
穗迎风面积					
株长					
重心(含穗)					
重心(不含穗)					
茎秆机械强度					
整节茎秆平均密度					
整节茎秆长					
整节茎秆粗					
整节茎秆平均壁厚					
弹性模量					
穗鲜重					
穗转动惯量					
整节茎秆鲜重					
整节茎秆截面弹性矩					
茎秆每一节茎秆密度					

茎秆每一节茎秆茎长
茎秆每一节茎秆粗
茎秆每一节茎秆壁厚
茎秆每一节茎秆弹性模量
茎秆每一节茎秆鲜重
茎秆每一节截面惯性矩

测得上述数据后，

(1) 首先可以将上述测试数据代入问题四所建立的模型，计算出对应模型下的对应指标；

(2) 考虑倒伏分级

分为最初倒伏、最终倒伏(日期及累计倒伏程度、面积)两次调查记载，汇总最终倒伏数据。分级标准为：不倒伏(1级)；倒伏轻微，植株倾斜角度小于 30° (2级)；中等倒伏，倾斜角度 $30^\circ \sim 45^\circ$ (3级)；倒伏较重，倾斜角度 $45^\circ \sim 60^\circ$ (4级)；倒伏严重，倾斜角度 60° 以上(5级)。

(3) 利用 SPSS 软件对所得的试验数据进行聚类分析、方差分析和相关分析。

(4) 在穗秆末梢安装加速度传感器、在茎秆底端安装角度传感器，通过采集传感器数据，进而实时测得在风载作用下小麦茎秆的动态运动过程，与建立的动态模型进行对比分析，同时也可以实际测得小麦茎秆可能发生的混沌现象，对验证系统的混沌特性和涉及相应混沌控制方法提供了理论依据。

8 模型的评价

8.1 主要有以下优点

1、通过合理假设得到各品种倒伏指数模型简单易懂，在实际操作中应用起来非常方便。

2、问题三建立的倒伏指数 Logistic 判别模型准确率达 99.1%，找到的小麦发生倒伏的原因合理，符合实际情况。

3、问题四建立的小麦茎秆抗倒伏模型。该模型既能计算弯曲或倒伏临界处的相关指标，如茎秆抗弯刚度、弹性模量、临界力、临界风速等，又能通过仿真观察茎秆随风载运动的整个运动轨迹，较一些简易模型，考虑因素更加全面；

4、根据建立的穗自重单独作用的静态模型，发现仅需测量穗鲜重、无风作用时小麦茎秆的自然长度（即株高），便可求出小麦茎秆的抗弯刚度，相比于传统的三点弯曲试验求抗弯刚度，在可操作性、难易程度和经济性上，均表现出良好优势，在试验验证后值得推广；

5、根据建立的穗自重与风载共同作用的动态模型，能够描述茎秆的整个运动轨迹，可结合实际的抗倒伏试验，即将理论分析与实践测试进行对比，从而提高茎秆倒伏研究工作的完整性。

8.2 模型的可行性分析

1、在问题五中，根据穗自重单独作用的静态模型，求得 07 年的不同品种、不同样本小麦茎秆的抗弯刚度，与前人的实验测试数据进行对比，其在数量等级上保持了一致，一定程度上验证了模型建立正确；

2、根据穗自重与风载共同作用的静态模型，求得得 07 年的不同品种的小麦茎秆的临界力和抗倒伏风俗，数量级在正确范围内，同时其得到的不同品种的抗倒伏能力排序与问题三中经过数据分析所得到的抗倒伏能力排序相同，从而也验证了模型正确；

8.3 模型存在的缺陷及改进建议

1、问题中的多数问题进行了理想化简化，某种程度上掩盖了某些信息，针对该问题，可结合实际实验，减少模型建立时的理想化假设的数量，使模型更符合实际情况；

2、未考虑倒伏部位，在实际的小麦倒伏情况中，小麦的倒伏部位并非固定不变，针对该问题，可风别进行不同部位的小麦倒伏特性测试；

3、未考虑小麦茎秆各节之间的弹性连接及相互之间的影响，针对该问题，可进行相邻两节之间的弹性测试，从而分析出相邻节之间的内部作用。

参考文献

- [1] 王健.抗倒伏小麦茎秆结构、化学特征及快速筛选的方法学研究[D].福建师范大学,2006
- [2] 余泽高,李志新,严波.小麦茎秆机械强度与若干性状的相关性研究[J].湖北农业科学, 2003,4: 11-14
- [3] 杨艳华,朱镇,张亚东等.不同水稻品种(系)抗倒伏能力与茎秆形态性状的关系[J].江苏农业学报, 2011, 27(2): 231-235.
- [4] 陈浩,何婷婷,姬东鸿.基于 k-means 聚类的无导词义消歧[J]. 中文信息学报, 2005,(04)
- [5] 毕硕本, 闫国年, 陈济民. 郑州—洛阳地区史前连续文化聚落的 K-means 聚类挖掘研究[J]. 地理与地理信息科学, 2007,(05)
- [6] 胡海岩,《应用非线性动力学》[M], 北京, 航空工业出版社: 2000.
- [7] 许本安, 李秀治,《材料力学》[M], 上海, 上海交通大学出版社: 1988.
- [8] 袁红梅,小麦茎秆生物力学性能试验与抗倒伏理学评价分析[D], 山西农业大学:2005.
- [9] 刘鸿文.材料力学[M].高等教育出版社,1999,60~173
- [10]郭维俊,王芬娥,黄高宝等.小麦茎秆力学性能与化学组分试验.农业机械学报, 2009, 40: 110-114
- [11]郭玉明,袁红梅,阴妍等.茎秆作物抗倒伏生物力学评价研究机关联分析.农业工程学报, 2007, 23(7): 14-18
- [12]胡婷,付志一,焦群英.小麦茎秆抗弯性能研究.农业工程学报, 2006, 22(10): 31-35
- [13]李红波,郭玉明,陈维毅.冬小麦茎秆的力学性质研究.太原理工大学学报, 2006, 37(1): 31-34
- [14]梁莉,郭玉明.不同生长期小麦茎秆力学性质与形态特性的相关性.农业工程学报, 2008, 24(8): 131-134
- [15]罗茂春,田翠婷,李晓娟等.水稻茎秆形态结构特征和化学成分与抗倒伏关系综述.西北植物学报, 2007, 27(11): 2346-2353
- [16]田保明,杨光圣.农作物倒伏及其评价方法.中国农学通报, 2005, 21(7): 111-11
- [17]王芬娥,黄高宝,郭维俊等.小麦茎秆力学性能与微观结构研究.农业机械学报, 2009, 40(5): 92-95
- [18]王勇,李晴祺.小麦品种抗倒性评价方法的研究.华北农学报, 1995, 10(3): 84-88
- [19]王勇,李斯深,李安飞等.小麦种质抗倒性的评价和抗倒性状的相关于通径分析.西北植物学报, 2000, 20(1): 79-85
- [20]徐磊,王大伟.小麦基部节间茎秆密度与抗倒性关系研究.麦类作物学报, 2009, 29: 673-67
- [21]袁志华,冯宝萍,赵安庆等.作物茎秆抗倒伏的力学分析及综合评价探讨.农业工程学报, 2002, 18: 30-3
- [22]袁志华,郑桂梅,苏宗伟.典型风荷载对小麦茎秆倒伏的影响. 2005, 23(1): 54-55
- [23]赵安庆,袁志华.玉米茎秆抗倒伏的力学机制研究[J].生物数学学报, 2003, 18(3): 311-31
- [24]郭翠花,高志强,苗果园.不同产量水平下小麦倒伏与茎秆力学特性的关系.农业工程学报, 2010, 26(3): 151-155

附录

附录一 各品种茎秆外部特征相关系数

1、国信 1 号品种

表 12 国信 1 号外部特征 spearman 相关系数

外部特征	W_{I2}	W_I	L	$L_{\text{穗}}$	W_2	W_5
W_{I2}	1.000					
W_I	.645(**)	1.000				
L	.323(*)	.509(**)	1.000			
$L_{\text{穗}}$	.290	.299	.327(*)	1.000		
W_2	-.763(**)	-.095	-.001	-.079	1.000	
W_5	.037	.056	.009	.169	.037	1.000

2、智 9998 号品种

表 13 智 9998 号外部特征 spearman 相关系数

	W_2	W_{I2}	W_I	L
W_2	1.000			
W_{I2}	-.806(**)	1.000		
W_I	.021	.523(**)	1.000	
L	.268	-.150	.170	1.000

3、联丰 85 品种

表 14 联丰 85 外部特征 spearman 相关系数

外部特征	W_{23}	$m_{\text{穗}}$	m_I	W_2	L	W_{I2}	L_5	W_I	W_3
W_{23}	1.000								
$m_{\text{穗}}$	.247	1.000							
m_I	-.091	.050	1.000						
W_2	.755(**)	.133	-.094	1.000					
L	-.049	.170	.488(**)	.169	1.000				
W_{I2}	-.437(**)	-.082	.561(**)	-.707(**)	-.060	1.000			
L_5	-.151	-.043	.085	.104	.341(*)	-.034	1.000		
W_I	.145	.126	.768(**)	.106	.171	.553(**)	.065	1.000	
W_3	-.476(**)	-.115	-.085	.171	.196	-.296	.317(*)	-.154	1.000

4、TM 品种

表 15 TM 品种外部特征 spearman 相关系数

外部特征	W_{23}	$m_{\text{穗}}$	m_I	W_2	L	W_{I2}	L_5
W_{23}	1.000						
$m_{\text{穗}}$	-.234	1.000					
m_I	-.167	.132	1.000				
W_2	-.352(*)	.392(*)	.513(**)	1.000			
L	.088	.304	.222	.025	1.000		
W_{I2}	-.092	-.263	.494(**)	.032	-.170	1.000	

L_5	-.710(**)	.059	.054	.077	-.303	.102	1.000
-------	-----------	------	------	------	-------	------	-------

5、平安 6 号品种

表 16 平安 6 号外部特征 spearman 相关系数

外部特征	L_2	W_{23}	B_3	W_{12}	m_1
L_2	1.000				
W_{23}	-.440	1.000			
B_3	.150	-.074	1.000		
W_{12}	-.509	.352	.140	1.000	
m_1	-.499	.261	.408	.481	1.000

6、温麦 6 号品种

表 17 温麦 6 号外部特征 spearman 相关系数

外部特征	$m_{穗}$	L_5	W_{45}	W_{23}
$m_{穗}$	1.000			
L_5	-.313	1.000		
W_{45}	-.045	-.345	1.000	
W_{23}	-.045	-.092	.332	1.000

7、郑麦 9023 品种

表 18 郑麦 9023 外部特征 spearman 相关系数

外部特征	FW	W_2	$m_{穗}$
FW	1.000		
W_2	.593(**)	1.000	
$m_{穗}$	.962(**)	.681(**)	1.000

8、周麦 22 品种

表 19 周麦 22 外部特征 spearman 相关系数

外部特征	FW	W_2	L	$m_{穗}$
FW	1.000			
W_2	.645(**)	1.000		
L	.339	.199	1.000	
$m_{穗}$	.921(**)	.722(**)	.168	1.000

9、豫麦 18 品种

表 20 豫麦 18 外部特征 spearman 相关系数

外部特征	W_{12}	$m_{穗}$	W_1	m_3	W_3
W_{12}	1.000				
$m_{穗}$	-.300	1.000			
W_1	.120	.429	1.000		
m_3	-.139	.814(**)	.579(*)	1.000	
W_3	-.479	.618(*)	.433	.525(*)	1.000

附录二 矮抗 58、新麦 208 和周麦 18 三种品种蜡熟期所有样品指标值

	穗迎 风面 积 cm^2	密度 kg/m^3	茎秆长 cm	茎秆粗 cm	茎秆壁厚 cm	弹性模量 GPa	穗鲜重 g	穗转动惯量 $10^{-7} kg \cdot m^2$	茎秆鲜重 g	茎秆截面惯性矩 mm^4
矮抗 58	0.7268	1155.45	69.42436	0.3025	0.05	567.2228	3.8116	3.57788	6.7084	3.284869527
样本 1	0.4525	921.933	70.48427	0.2325	0.05	931.9823	2.3732	1.56808	4.1768	1.283073686
样本 2	0.5734	1092	70.83445	0.2475	0.05	950.7836	3.0072	3.63837	5.2928	1.609572293
样本 3	0.4518	959.796	72.26317	0.2175	0.05	1248.834	2.3696	2.44785	4.1704	1.004950698
样本 4	0.6135	1103.29	73.52512	0.2525	0.05	1019.789	3.2174	4.94499	5.6626	1.729842523
样本 5	0.5085	1057.29	74.68321	0.215	0.05	1566.481	2.6667	3.99752	4.6933	0.963020867
样本 6	0.4677	985.452	71.21878	0.2225	0.05	1154.986	2.4529	1.81388	4.3171	1.092528729
样本 7	0.4152	978.415	67.46768	0.21	0.05	1138.765	2.1775	3.02874	3.8325	0.882787536
样本 8	0.6584	1151.25	74.15119	0.2575	0.05	1037.444	3.4529	5.42452	6.0771	1.85607687
样本 9	0.5852	1156.25	69.67636	0.2425	0.05	1010.658	3.0688	2.02348	5.4012	1.495118919
样本 10	0.6653	994.119	68.74982	0.325	0.05	396.5013	3.4891	1.18049	6.1409	4.218447167
样本 11	0.6031	1037.20	74.66923	0.26	0.05	930.8679	3.163	4.81414	5.567	1.921476607
样本 12	0.7012	1173.22	73.2299	0.2725	0.05	880.3486	3.6775	4.62224	6.4725	2.272037236
样本 13	0.4898	1124.13	68.4592	0.2125	0.05	1323.913	2.5688	0.808514	4.5212	0.922305949
样本 14	0.5942	1044.19	69.07996	0.275	0.05	642.5649	3.1159	1.89528	5.4841	2.346990605
样本 15	0.6045	1040.19	76.08952	0.255	0.05	1038.731	3.1703	0.383176	5.5797	1.792204978
样本 16	0.4947	1240.62	66.56043	0.2	0.05	1583.125	2.5942	2.7938	4.5658	0.736310778
样本 17	0.5769	1054.91	72.30806	0.2525	0.05	927.4497	3.0254	1.42147	5.3246	1.729842523
样本 18	0.5872	1092.07	69.72049	0.2575	0.05	818.0388	3.0797	1.89438	5.4203	1.85607687
新麦 208	0.5182	1594.846	76.93	0.235	0.03	1573.404	2.7174	1.5498	4.7826	1.036681397
样本 1	0.5126	1615.725	83.08	0.2125	0.03	2559.045	2.6884	3.69443	4.7316	0.735443772
样本 2	0.5555	1547.34	81.53	0.245	0.03	1645.3	2.913	2.39403	5.127	1.193633403
样本 3	0.5617	1682.258	79.06	0.235	0.03	1801.348	2.9457	2.79896	5.1843	1.036681397
样本 4	0.5306	1892.265	77.05	0.2025	0.03	2689.350	2.7826	2.46481	4.8974	0.623001753
样本 5	0.5914	1868.774	80.96	0.2175	0.03	2588.669	3.1014	6.73082	5.4586	0.796458165
样本 6	0.4353	1462.561	75.27	0.22	0.03	1583.718	2.2826	1.54978	4.0174	0.828202363
样本 7	0.5119	1647.387	78.60	0.22	0.03	2031.240	2.6848	2.0867	4.7252	0.828202363
周麦 18	0.5154	1140.42	81.1208	0.2325	0.04	1543.351	2.7029	1.87583	4.7571	1.168881089
样本 1	0.3675	1253.284	80.2537	0.1525	0.04	4997.897	1.9275	1.45606	3.3925	0.251928733
样本 2	0.3986	905.3129	78.1978	0.235	0.04	1068.259	2.0906	0.844557	3.6794	1.213734687
样本 3	0.4767	1153.43	78.4	0.22	0.04	1621.218	2.5	1.26617	4.4	0.961327352
样本 4	0.6087	1301.369	81.3282	0.24	0.04	1638.485	3.192	1.58155	5.618	1.306902544
样本 5	0.4249	992.3569	82.1555	0.2175	0.04	1652.568	2.2283	1.403	3.9217	0.923056372

附录三 2008 年计算茎秆重心

%重心计算函数

%输入，5 节茎秆长度、重量

clear

X=[X(:,1) X(:,4) X(:,5) X(:,8) X(:,9) X(:,12) X(:,13) X(:,16) X(:,17) X(:,20)];

x=zeros(5,2);

```

for j=1:size(X,1)
    x(1,:)=X(j,1:2);
    x(2,:)=X(j,3:4);
    x(3,:)=X(j,5:6);
    x(4,:)=X(j,7:8);
    x(5,:)=X(j,9:10);
    x_G=[x(:,1)/2 x(:,2)];
    %穗下 45 节
    M0=x_G(5,2);
    G0=x_G(5,1);
    height=x(5,1);
    for i=4:-1:1
        %      temp=x_G(i,2)*(G0+x_G(i,1))/(M0+x_G(i,2));
        temp=x_G(i,2)*(height-G0+x_G(i,1))/(M0+x_G(i,2));
        G0=G0+temp;
        M0=M0+x_G(i,2);
        height=height+x(i,1);
    end

    GG(j,1)=M0;
    GG(j,2)=G0;
End

```

附录四 2011 年温麦穗重计算

```

data=[5.9 63.2 38.5 28 9
5.52 63.2 40 30 9
6.63 55.6 34.5 26.4 8.9
7.4 61.1 37.5 28.4 9
8.27 65.2 39 30.1 9.5
6.08 62.8 38 29.2 8.8
3.99 62.5 37 29.9 7.5
5.03 64.2 38 28 8.6
4 75.3 44.2 34.8 7.5
4.95 75.2 45 34.5 8.7
3.09 70.8 41 33 7
5.52 64.4 39 30.2 8.9
4.89 63 37 28.3 8.6
4.33 61.9 35 28 7.5
6.98 62.7 38 28.6 9.2
6.72 62.2 39 28.6 9.5
7.18 65.3 39 29.3 9
3.94 63.6 37 27.8 7.5
8.23 62.9 39 28.9 9.8
5.02 60.8 35.5 26.5 7.9

```

```

5.92 57 35 26.1 8.3
5.88 60.8 36.5 28 7.5
4.57 58.6 33.5 24.9 8.4
4.32 56.9 33.5 26.7 7
4.16 63.9 42.31 27.1 9.45
6.56 73.3 50.6 31.4 10.3
3.83 62.5 43.1 27.3 9
4.44 65.55 45.6 29.1 8.51
5.71 69.6 46.5 31 9.91
6.4 68.95 49.3 30.1 9.42
];
Sui_mass=data(:,1).*(data(:,3)-data(:,4))./(data(:,4)+0.5.*data(:,5)-(data(:,3)-data(:,4)))

```

附录五 动态模型仿真

同一风速下 07 年三种小麦品种的动态模型仿真

```

%模型参数, 密度 杆长 粗度 厚度 E 穗鲜重 穗转动惯量 茎秆重 I
%实际数据结构 密度 茎秆长 茎秆粗 茎秆壁厚 弹性模量 穗鲜重 穗转动惯量 茎秆鲜重 茎秆
截面惯性矩
data_ai=[1071.67 71.18922 0.247895 0.05 1008.867 2.972721 2.75152 5.232015789 1.736712335];
data_xin=[1663.895 79.06 0.223438 0.03 2059.009 2.764488 2.90867 4.8655125
0.884788077];
data_zhou=[1124.362 80.24267 0.21625 0.04 2086.963 2.440217 1.40453 4.294783333
0.970971796];
wind=250;
f=100
rou=data_ai(1);
L=data_ai(2);
b=data_ai(3);
h=data_ai(4);
E=data_ai(5);
m=data_ai(6);
Jm=data_ai(7);
M=data_ai(8);
I=data_ai(9);
sim('copy_model.mdl',20);
q1_ai=q1;
q2_ai=q2;
sita_ai=sita;
sita_v_ai=sita_v;
rou=data_xin(1);
L=data_xin(2);
b=data_xin(3);
h=data_xin(4);
E=data_xin(5);

```

```

m=data_xin(6);
Jm=data_xin(7);
M=data_xin(8);
I=data_xin(9);
sim('copy_model.mdl',20);
q1_xin=q1;
q2_xin=q2;
sita_xin=sita;
sita_v_xin=sita_v;
rou=data_zhou(1);
L=data_zhou(2);
b=data_zhou(3);
h=data_zhou(4);
E=data_zhou(5);
m=data_zhou(6);
Jm=data_zhou(7);
M=data_zhou(8);
I=data_zhou(9);
sim('copy_model.mdl',20);
q1_zhou=q1;
q2_zhou=q2;
sita_zhou=sita;
sita_v_zhou=sita_v;
figure
title('风速为时矮抗 58、新麦 208、周麦 18 的运动分析')
subplot(221)
plot(t,q1_ai,'r',t,q1_xin,'b',t,q1_zhou,'g')
xlabel('t/s')
ylabel('q1')
subplot(222)
plot(t,q2_ai,'r',t,q2_xin,'b',t,q2_zhou,'g')
xlabel('t/s')
ylabel('q2')
subplot(223)
plot(t,sita_ai,'r',t,sita_xin,'b',t,sita_zhou,'g')
xlabel('t/s')
ylabel('theta')
subplot(224)
plot(t,sita_v_ai,'r',t,sita_v_xin,'b',t,sita_v_zhou,'g')
xlabel('t/s')
ylabel('theta^')

```