

联合收获机双风道人字变斜式叶轮横流风扇^{*}

王长宁¹ 宁学贵² 王潮璐³

(1. 新疆中收农牧机械公司, 乌鲁木齐 830011; 2. 中国农业机械工业协会, 北京 100083;
3. 昆明百世信息技术有限责任公司, 昆明 650106)

摘要: 针对谷物联合收获机现有 D2 机型切轴流脱分系统产生的高含杂清选物和清选风扇存在的问题,从清选系统角度论述该类联合收获机双风道人字变斜式叶轮横流风扇特殊结构性能,包括人字变斜式叶轮设计,蜗壳分离风道和清选风道特殊几何形状和布局。台架试验表明,孔口自由射流等外特性及其调控满足预清选和风筛清选流场分布要求。经与 J4 机型匹配田间麦收性能测试,在相关标准规定的收获作业条件下,统计结果平均指标:喂入量为 4.81 kg/s,清选喂入量为 2.65 kg/s,清选损失率为 0.17%,籽粒含杂率为 0.65%。复脱抛扔器工作正常。

关键词: 联合收获机 双风道风扇 横流风扇

中图分类号: S225.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2013)S2-0017-05

Design and Test of Combine Harvester Cross-flow Fan with Double Channels and Herringbone Variable Inclined Impeller

Wang Changning¹ Ning Xuegui² Wang Chaolu³

(1. Xinjiang Zhongshou Agricultural Animal Hush Dry Machinery Company, Urumqi 830011, China
2. China Agricultural Machinery Industry Association, Beijing 100083, China
3. Kunming Best Information Technology Co., Ltd., Kunming 650106, China)

Abstract: With the aim to deal the problems of the impurity cleaning materials and cleaning fan for D2 models of grain combine harvester, the special structure performance of cross-flow fan with double channels and herringbone variable inclined impeller was discussed from a point of view on cleaning system, including design of herringbone variable inclined impeller and the special structure of volute separation and cleaning air duct. The bench test shows that features and regulation of the orifice free jet meet flow distribution requirements of the pre-cleaning and wind screen cleaning. The matching test to the J4 models showed that the statistical average index were as follows: feed rate of 4.81 kg/s, cleaning feed rate of 2.65 kg/s, cleaning loss rate of 0.17%, grain impurity rate of 0.65%. The rethreshing thrower works properly.

Key words: Combine harvester Double channels fan Cross-flow fan

引言

以新疆-2 自走式谷物联合收获机为代表的 D2 机型,因采用强化的切轴流脱分系统而产生高含杂清选物,根据新疆麦收试验统计分析,具有传统双切流滚筒+逐稿器脱分系统的 4LQ-2.5 机型在标准规定的麦收条件下产生的清选物占喂入量的 5%~

8%,而同比条件下的 D2 机型却达到 12%~18%,后者为前者的 2.25~2.4 倍。由于传统单风道离心扇内部二次环流作用,离心力使气流速度偏向蜗壳一方,使其出口口断面产生压力梯度,因而在风道孔口铅垂方向自由射流速度也呈现梯度分布。台架试验表明,孔口上层预清选气流速度值只有下层的 60%~70%,这一固有特性使原本要求强势的预清

收稿日期: 2013-06-20 修回日期: 2013-07-10
^{*} 企业自主项目
作者简介: 王长宁,正高级工程师,主要从事农机流体工作部件研究, E-mail: wcl321@163.com

选气流本末倒置,加之系统设计上局限于短抖动板,使预清选性能变得更差。因此,以传统单风道风筛清选系统去适应高效率机型、高含杂清选负荷容易引起筛面堆积。

针对这一技术问题,有的设计者采用较大风扇安装角或提高风扇转速,但其负面影响是二次清选物增加,复脱抛扔器堵塞风险概率增大,或是籽粒吹出损失超标。由于在风道内设置调风板影响风扇性能,已被淘汰,对此,国内外学者从 20 世纪 70 年代起不断将不同形式的双风道风扇或多风扇引入轴流式机型。本文拟采用双风道人字变斜式叶轮横流风扇对现有 D2 机型存在的高含杂清选物和清选风扇问题加以解决。

1 设计思想和结构性能特点

1.1 设计思想

收获机风筛清选系统应由风扇主导,清选风扇性能不取决于“风大”或“风小”,而应该基本遵循聂柳波夫 А И 等提出的清选三原则,即:气流速度在筛面纵向呈双曲线衰减分布;气流速度在筛面横向分布基本均匀、两侧略高;风量为颖糠量的 2 ~ 5 倍^[5]。本质上体现了强化预清选和筛面流场合理分布的主导思想。

由于横流风扇比农用离心风扇具有以下优点:①有较高的效率和动压分配比例,表现出气流对清选室的纵深气动影响力。②叶轮长径比设计选择范围宽,特别适宜宽度大的清选室。③气动特性有良好的调控性能,易实现人工智能调控。④同比条件下不仅结构尺寸紧凑,动平衡和装配工艺性好,而且作业转速和功耗相对较低。⑤对作业环境中吸入的碎茎叶等杂余具有良好的自清作用,叶轮不缠草。⑥在布局上一般由于进气口靠近机器中央传动箱,作业时具有风冷散热功能。又由于径向进、出气,在结构设计方面横流扇还是变异双风道的最佳风扇,因而成为最具技术发展潜力的清选风扇。

本文以 J4 机型双风道人字变斜式横流风扇为例(图 1),从清选系统角度探讨人字变斜式叶轮设计、蜗壳上风道(分离风道,下同)和下风道(清选风道,下同)几何形状和布局、孔口自由射流特性等外特性及其调控方面技术问题。

1.2 人字变斜式叶轮

人字变斜式叶轮结构主要参数:叶轮外径 d_2 为 300 mm,叶轮内径 d_1 为 240 mm,平均外周叶片角 β_2 为 27° ,平均内周叶片角 β_1 为 90° ,两组对称圆弧叶片人字型夹角 ψ 为 172.7° ,叶片扭曲角 γ 为 2° ,圆弧叶片人字型排列组数 Z 共 24 对(图 2)。

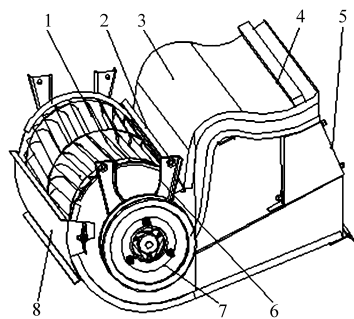


图 1 J4 机型双风道人字变斜式叶轮横流风扇结构示意图
Fig.1 Schematic of J4 models with double channels and cross flow fan with herringbone variable inclined impeller

1. 人字变斜式叶轮 2. 稳压板 3. 双风道蜗壳 4. 密封条
5. 封闭板 6. 吊耳(左、右) 7. 变速带轮 8. 分风比调节盖

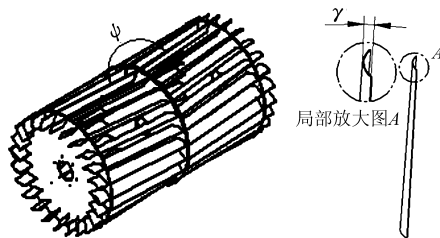


图 2 人字变斜式叶轮和叶片示意图

Fig.2 Schematic of herringbone variable inclined impeller and vane

相对于叶片直线排列叶轮横流风扇,由于难于避免的结构和工艺设计影响因素,包括两侧偏高的摩阻、转子安全侧间隙泄漏和局部涡流损失等,工作时会产生不同程度的边界效应,影响孔口自由射流速度横向分布均匀、两侧略高的原则。台架气动试验统计表明,在矩形孔口宽度两侧各有 15% 左右小区是弱风区,该区平均流速只有孔口平均流速 50% ~ 70%,这一弱效应容易引起筛面两侧局部区域清选物堆积,麦芒倒插结饼而降低有效筛分面积,尤其对 D2 型内驱动筛箱(风道孔口宽度小于筛宽)更为突出。人字变斜式叶轮和横向渐扩风道结构设计(图 1、2)克服了边界弱效应,而且在确保横向基本均匀前提下,进一步提高了边界气流速度及其横向扩散性能。

图 3 测试条件:分风比调节盖撤消;水平坐标位于孔口高度中线,测点为正视孔口从左内侧至右内侧均布;采用 EY3-2A 型微风仪测定(下同)。

上、下风道孔口自由射流比风速分别为

$$\begin{cases} W_{si} = V_{si}/V_{sm} \times 100\% \\ W_{xi} = V_{xi}/V_{xm} \times 100\% \end{cases} \quad (1)$$

式中 V_{si} 、 V_{xi} ——上、下风道孔口自由射流测点风速, m/s

V_{sm} 、 V_{xm} ——上、下风道孔口自由射流各测点风速算术平均值, m/s

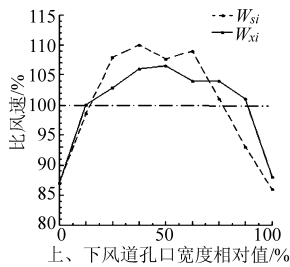


图3 孔口自由射流风速横向分布曲线

Fig. 3 Orifice free jet transverse velocity distribution curve

图4 测试条件:分风比调节盖撤消;鱼鳞筛片2/3开度,静态测定;测点为正视风扇孔口,从筛箱左内侧至右内侧均布,贴近上筛面。

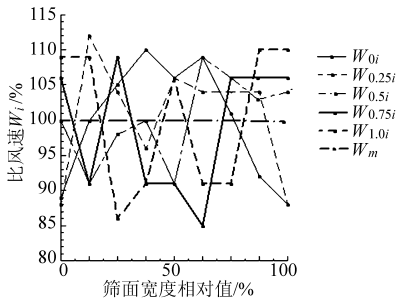


图4 双风道清选系统不同纵向位置横截面风速分布曲线

Fig. 4 Different longitudinal positions cross-sectional velocity distribution curve about double channel cleaning system

清选室预清选或筛面测点比风速为

$$W_i = V_i / V_m \times 100\% \quad (2)$$

式中 V_i ——预清选或筛面测点风速, m/s

V_m ——预清选或筛面各横断面测点风速算术平均值, m/s

图3表明,上、下风道孔口自由射流的比风速 W_{si} 和 W_{xi} 横向分布曲线的样本标准离差 S_{si} 和 S_{xi} , 经统计计算分别为 9.52% 和 7.35%, 两侧微小区域最低风速为各自平均值的 87% 和 88%, 但由于人字变斜式叶轮和渐扩风道产生的准三元流特性, 以及风道内的压力梯度, 工作中气流的横向扩散能力将被放大。从图4不难看出, 孔口自由射流反映在清选系统中纵向筛面各截面比风速 W_i 横向分布曲线的样本标准离差 S_0 、 $S_{0.25}$ 、 $S_{0.5}$ 、 $S_{0.75}$ 和 $S_{1.0}$, 经统计计算分别为 8.46%、8.24%、6.2%、9.25% 和 10.22%, 两侧微小区域最低风速分别达到各自平均值的 87%、88%、100% 和 104%、106%、109%、110%, 分布基本均匀, 两侧从略低逐步过渡到略高, 具体表现是 W_i 筛面后半段优于前半段区域。

试验证明, 人字变斜式叶轮结构还有效降低了高频噪声, 这对固有高噪声的横流扇很重要。

1.3 双风道蜗壳几何形状特点

蜗壳设计优劣是影响风扇性能的重要因素。本风扇双风道蜗壳结构设计主要参数如图5、6所示:

进气角 θ_j 为 128° , 上出气角 θ_{sc} (上扩压弧所对应的圆心角) 为 53° , 上风道孔口自由射流角 λ_s 为 30° (主射流, 下同), 下出气角 θ_{xc} (下扩压弧所对应的圆心角) 为 135° , 下风道孔口自由射流角 λ_x 为 20° (主射流, 下同), 壳间隙和上舌隙均为 7.5 mm, 下舌隙为 12 mm, 上、下风道横向渐扩角 φ 均为 6° , 侧间隙不大于 7 mm (蜗壳内侧与叶轮端面的间隙), 孔口均为矩型铅垂孔。

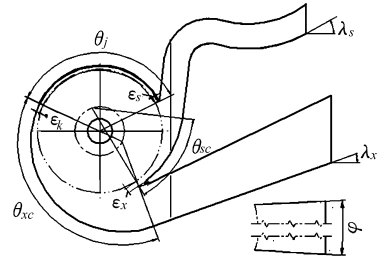


图5 双风道蜗壳侧面示意图

Fig. 5 Side schematic of double channels volute

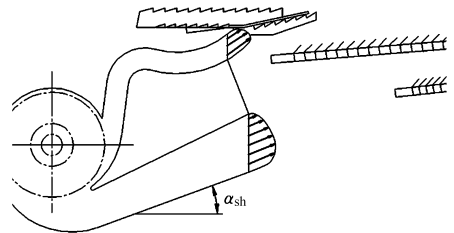


图6 J4 机型双风道风扇出口风速垂直分布示意图

Fig. 6 J4 models with double channel cross-flow fan outlet velocity vertical distribution diagram

本蜗壳几何形状使风扇具有以下特性: ①蜗壳下、上出气角比值为 $135^\circ/53^\circ = 2.55$, 原始分风比 τ (见 1.4 节) 实测为 2.25, 为实现分风比的使用调节范围提供有利条件。②基于清选室结构的特殊性, 以及上风道的相对独立性, 采用“S”形双弯道环流设计上风道, 使在有限空间条件下孔口自由射流角 λ_s 高达 30° , 而压力损失和对下风道影响很小。较高射流速度以较高的射流角作用于清选物, 在清选室盖特殊搓板结构等措施的共同配合下, 强化了预清选, 并淘汰了原 D2 型双风道清选室籽粒挡板, 使吹出损失降到可以忽略不计程度。所谓籽粒挡板, 是 D2 型上风道孔口低角度自由射流的被动附件, 是降低籽粒吹出损失的被动措施, 但却抬高了清选室挡板前局部静压, 不仅影响了风扇上、下风道气流特性, 而且使复脱后的二次清选物抛扔口气阻增加, 是产生高堵塞风险系数的重要因素; 风扇安装角 α_{sh} 和下风道孔口自由射流角 λ_x 均为 20° , 低于单风道普遍设计。升、降的上、下射流角充分满足倒阶梯筛较佳长宽比 2.25^[4]。③如上所述, 6° 的上、下风道横向渐扩角和不大于 7 mm 的侧间隙将进一步改善孔口自由射流在筛面横向均匀、两侧略高特性。

④上、下风道铅垂矩型孔口设计避免籽粒倒灌,进一步提高孔口自由射流的垂向扩散角,使小结构风扇具有大范围射流特性。⑤采用略大的上、下舌隙和壳隙确保上、下孔口自由射流的稳定性和横向均匀性。

1.4 气流特性调节及其装置

为了适应复杂变化田间作业条件,双风道风扇气流特性必须进行人工调节,包括风速、风量、分风比等调节,相应的调节装置(图1)包括:①变速带轮:通过加减动、静盘之间调整垫片厚度改变带轮的计算直径,从而改变传动比,实现孔口自由射流速度和流量的有级调节。由图7a可知,在分风比调节盖撤消条件下,上、下风道平均风速 V_{sm} 、 V_{xm} 和风量 Q_s 、 Q_x 与叶轮转速 n 呈正相关,遵从相似律,但与原始分风比 τ 基本无关。②分风比 $\tau(Q_x/Q_s)$ 调节盖:通过滑转此盖改变弧长关闭度 f ,从而改变进气角 θ_j ,实现下、上风道流量比调节。由图7b可知,在叶轮转速 $1\,000\text{ r/min}$ 条件下, $f=20\text{ mm}$ 时, $\tau=1.85$ 为曲线拐点;当 $f<20\text{ mm}$ 工况下, τ 和 $V_{xm}(Q_x)$ 与 f 呈负相关,而 $V_{sm}(Q_s)$ 与 f 呈正相关;当 $f>20\text{ mm}$ 工况下, τ 和 $V_{xm}(Q_x)$ 与 f 呈正相关,而 $V_{sm}(Q_s)$ 与 f 呈负相关。但无论 f 如何变化,总风量 Q 基本保持不变;值得注意的是,当 $f>50\text{ mm}$,即 $\tau>2.0$ 后风扇外特性曲线变化平稳。田间麦稻试验证明,当风扇转速 $n=1\,000\text{ r/min}$ 左右, $f=85\text{ mm}$ 左右,即 $\tau=2.5$ 时, $V_{xm}=18.7\text{ m/s}$, $V_{sm}=16\text{ m/s}$, $Q=2.85\text{ m}^3/\text{s}$,收获机有最佳的清选效率和综合性能质量指标,可以认为,这是一个最佳工况点。大量生产实践证明,在 $n=1\,000\text{ r/min}$ 左右, f 为 $70\sim 90\text{ mm}$ 范围内,即 τ 为 $2.3\sim 2.58$, V_{xm} 为 $18.4\sim 18.8\text{ m/s}$, V_{sm} 为 $16.3\sim 15.9\text{ m/s}$ 工况范围收获作业,机器均表现出良好的清选效率和质量指标,也就是说,风扇气流外特性在此区间表现出良好的鲁棒性。③稳压盖:与上舌隙配合增大内部涡旋强度,提高气动密封,减少反流损失,提高风扇效率。经台架试验优化,在上舌隙为 7.5 mm 和稳压盖弧长关闭度为 45 mm 表现出最佳风扇空气功率,要求作业时不允许调节。

分风比调节盖和稳压盖由于可拆装,便于叶轮焊接部件的装配工艺。

2 台架对比试验和田间麦收试验

测试条件和方法:台架空载试验风机转速均为 $1\,060\text{ r/min}$;单风道农用离心风扇月牙调风板全开;双风道风扇分风比调节盖关闭 60 mm ;双层倒阶梯鱼鳞片片 $2/3$ 开度;测点:纵向 0% 断面在筛前端抖动板下,为预清选测点高度,之后四断面均为贴近筛

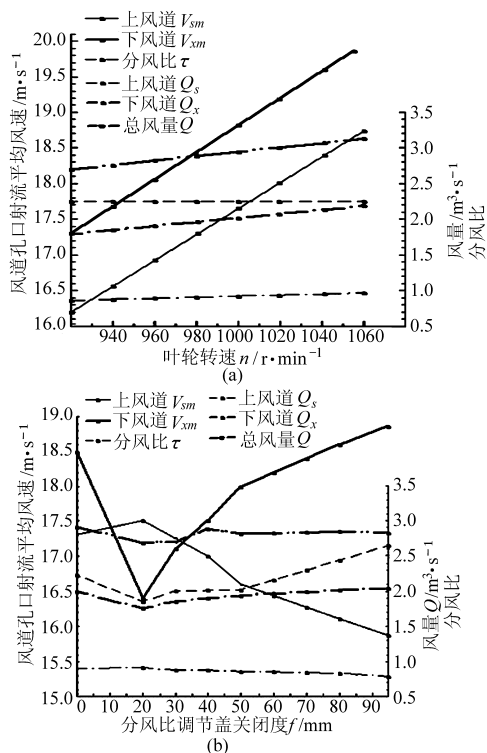


图7 风扇空气动力学特性曲线

Fig. 7 Air dynamic characteristics curve of fan

面高度。

清选室台架空载对比试验结果(图8)表明,与D2机型匹配的单风道和双风道系统预清选室和筛面纵向风速 V_{dm} 、 V_{shm} 分布均表现从强到弱衰减趋势,但双风道更突出强—弱—较强双曲线变化特点,具体表现是:筛前抖动板下预清选室 $V_{shm}>V_{dm}$,双风道系统预清选更强势;筛面纵向 $15\%\sim 45\%$ 区域, $V_{shm}<V_{dm}$,这是双风道系统独有的弱风区,经强化预清选后 80% 以上的干净籽粒轻松通过微弱气流气动作用的双层筛,再经下风道复式气流清选后,进入籽粒输送室;筛面纵向 45% 后区域 $V_{shm}>V_{dm}$, V_{shm} 表现小幅度上升态势,有效提高筛后半区筛面清选物浮动作用和尾区气流分离作用,有利于降低含杂率指标和减少二次清选物,从而有效降低复脱抛扔器堵塞风险概率。

2008年至2010年,本部件与J4机型的倒阶梯

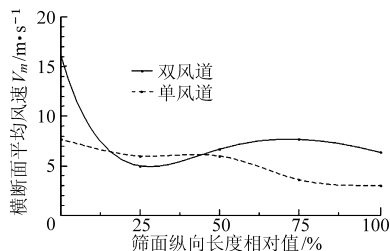


图8 清选室筛面纵向风速分布曲线

Fig. 8 Screen surface vertical velocity distribution curve of the cleaning room

鱼鳞筛匹配,完成了三轮样机麦、稻田间收获试验,试验地点在山东省高密郊区和江苏省淮安地区,收获期大都选在腊熟期,单产 6 000 ~ 7 500 kg/hm²,J4 机型通过了农业部鉴定。从表1中可知,在《JB/T

表 1 J4 机型麦收试验清选性能指标统计

Tab.1 Wheat cleaning performance

test statistics of J4 models

机器前进 速度 /km·h ⁻¹	喂入量 /kg·s ⁻¹	清选 喂入量 /kg·s ⁻¹	清选 损失率 /%	含杂率 /%
3.75	4.12	2.40	0.27	0.10
3.84	4.29	2.15	0.13	1.13
10.19	4.30	2.16	0.13	1.00
3.75	4.36	2.16	0.50	0.10
3.13	4.50	2.17	0.29	1.00
5.51	4.55	2.49		0.23
3.88	4.58	2.75	0.28	0.63
5.54	4.66	2.52		0.21
7.20	4.70	2.58		
8.06	4.75	2.84	0.10	0.42
5.30	4.80	2.84	0.37	0.15
3.93	5.00	2.82	0.03	0.97
5.95	5.39	3.02	0.45	1.00
8.24	5.48	2.78	0.03	0.96
8.24	5.53	2.83	0.02	1.20
7.71	5.95	3.59	0.05	1.30
平均值	5.89	4.81	2.65	0.17
标准高差	2.14	0.52	0.44	0.17

5117—2006 全喂入联合收获机 技术条件》规定的小麦收获作业条件下,平均清选性能指标:喂入量 4.81 kg/s,清选喂入量 2.65 kg/s,清选损失率 0.17%,籽粒含杂率 0.65%。颖糠量占喂入量 12% ~ 18%,按平均喂入量 4.81 kg/s 计,颖糠量为 0.58 ~ 0.87 kg,载体总风量 Q 为 2.85 m³/s,空气质量约为 3.42 kg/s(按 1.2 m³/s 容重计), Q 与清选物的质量比为 3.9 ~ 5.9 倍。试验还证明复脱抛扔器工作始终正常。

3 结论

(1) 双风道人字变斜式叶轮横流风扇独特的结构设计和气动特性调控,使最佳工况下孔口总风量(质量)为清选颖糠量的 3.9 ~ 5.9 倍;清选室筛面风速横向均匀性标准离差为 6.2% ~ 10.22%,两侧前半段风速比平均值低 0 ~ 13%,后半段高 0 ~ 11%;风速在预清选和筛面纵向呈高一低一略高双曲线衰减分布,充分满足了聂柳波夫 А И 等提出的清选三原则,台架试验证明设计合理。

(2) 进一步揭示了影响双风道人字变斜式叶轮横流风扇空气动力学特性的内在规律。

(3) 大量田间麦收试验结果为:喂入量为 4.81 kg/s,清选喂入量为 2.65 kg/s,清选损失率为 0.17%,籽粒含杂率为 0.65%。平均喂入量比 D2 机型的3.5 kg/s提高 37% 左右,并有效降低了复脱抛扔器堵塞风险概率。

参 考 文 献

1 金承烈,刘广海,孙皓训. 双风道清选部件的试验研究[J]. 农业机械学报,1984,15(3):90 ~ 96.
Jin Chenglie, Liu Guanghai, Sun Haoxun. Test and research of double-channels cleaning apparatus for rice and wheat[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,1984,15(3): 90 ~ 96. (in Chinese)

2 王泽群,肖林桦,刘广海. 双风道清选装置的研究[J]. 农业机械学报,1988,19(4):41 ~ 47.
Wang Zequn,Xiao Linhua,Liu Guanghai. Cleaning the threshed materials in the duplex air-flow cleaning unit [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,1988,19(4): 41 ~ 47. (in Chinese)

3 王成芝,刘简,周天培,等. 双风道贯流风机的试验研究[J],农业机械学报,1989,20(1):26 ~ 37.
Wang Chengzhi,Liu Jian,Zhou Tianpei, et al. A research on cross fan with two air flow out-lets[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,1989,20(1): 26 ~ 37. (in Chinese)

4 孙秀芝,程革,程万里. 平面往复运动筛面尺寸对筛分性能影响的试验研究[J]. 农业机械学报,1990,21(4):46 ~ 52.
Sun Xiuzhi,Cheng Ge,Cheng Wanli. The study of the method of plane screen's measurement design [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 1990,21(4):46 ~ 52. (in Chinese)

5 Нелюбов А И,Ветров Е Ф,П оляков А Ф. Аэродинамика тракта очистки зерноуборочных комбайно [J]. Тракторы и сельхозмашины ,1985(6):35 ~ 39.

6 李庆宜. 通风机[M]. 北京:机械工业出版社,1981.

7 埃克 В. 通风机[M]. 沈阳鼓风机研究所,等,译. 北京:机械工业出版社,1983.

8 浙江大学数学系高等数学教研组. 工程数学概率论与数理统计[M]. 北京:人民教育出版社,1983.