

固体小火箭药柱自动检测方法研究

汪辉强, 陈子豪, 邓清辉*, 罗伟, 冯川, 褚宏昊, 陈思皓, 黄蕾, 余泉, 李泓庐

四川航天川南火工技术有限公司, 四川 泸州

收稿日期: 2025年5月12日; 录用日期: 2025年6月5日; 发布日期: 2025年6月12日

摘要

通过对药柱自动检测过程进行梳理分析, 以及对检测过程中所需的通用夹爪夹持力、外径、长度检测所需的夹紧力、内径检测所需的涨紧力进行理论分析和试验验证, 设计了相应的自动化检测装置, 对药柱进行自动检测。通过药柱自动检测工艺技术研究, 突破药柱内孔自动检测技术, 实现药柱的自动检测及人机隔离, 降低操作人员劳动强度, 提高药柱检测效率及信息化程度。

关键词

药柱, 自动检测

Research on Automatic Detection Method of Solid Small Rocket Grain

Huiqiang Wang, Zihao Chen, Qinghui Deng*, Wei Luo, Chuan Feng, Honghao Chu, Sihao Chen, Lei Huang, Quan Yu, Honglu Li

Sichuan Aerospace Chuannan Initiating Explosive Technology Limited, Luzhou Sichuan

Received: May 12th, 2025; accepted: Jun. 5th 2025; published: Jun. 12th, 2025

Abstract

Through sorting and analyzing the automatic detection process of solid small rocket grain, as well as theoretical analysis and experimental verification of the universal gripper clamping force required during the detection process, the clamping force required for outer diameter and length detection, and the tension force required for inner diameter detection, corresponding automatic detection devices were designed to automatically detect solid small rocket grain. Through the research of automatic detection technology for solid small rocket grain, breakthroughs have been made in automatic detection technology for solid small rocket grain inner holes, achieving automatic detection and human-machine isolation of solid small rocket grain, reducing the labor intensity of operators, and improving the efficiency and informatization level of solid small rocket grain detection.

*通讯作者。

文章引用: 汪辉强, 陈子豪, 邓清辉, 罗伟, 冯川, 褚宏昊, 陈思皓, 黄蕾, 余泉, 李泓庐. 文章标题[J]. 机械工程与技术, 2025, 14(3): 305-319. DOI: 10.12677/met.2025.143029

Keywords

Grain, Automatic Detection

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.
This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).
<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



1. 引言

固体小火箭在接收点火元件后，点燃内装药柱，产生高温、高压燃气从喷管喉部高速喷出，形成推力，完成预定功能。其具有结构简单、冲量大、使用方便等特点[1]，广泛应用于火箭、卫星和飞船等航天飞行器的级间分离正(反)推、整流罩分离、星箭起旋、筒盖侧推、弹头姿态调整和控制等[2]-[4]。药柱是由具有一定几何形状的固体推进剂加工而成的装药组件，是固体小火箭的核心主装药[5]。典型药柱结构图如图 1 所示。

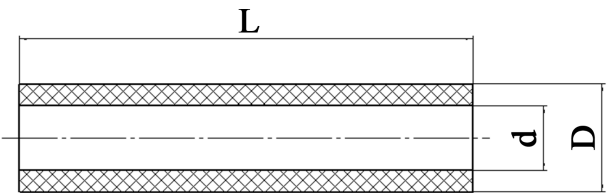


Figure 1. Typical grain structure diagram
图 1. 典型药柱结构图

药柱直径范围为($\Phi 20\sim\Phi 152$) mm，内径范围为($\Phi 2.5\sim\Phi 49$) mm，长度范围为(180~550) mm，尺寸规格 60 余种，单根重量一般不超过 2 Kg。

药柱检测的具体流程为：药柱加工完成后，先确认装配该类药柱的 1 发固体小火箭所需药柱数量，然后对药柱长度进行检测，按照长度值散差在 0.2 mm 以内进行分类，分组完成后，测量药柱外径及内径，并将分在同一组的药柱长度值、外径值、内径值在装配记录表中填写在一起，然后进行编号，最后在记录表中填写本组药柱编号，其流程图如图 2 所示。

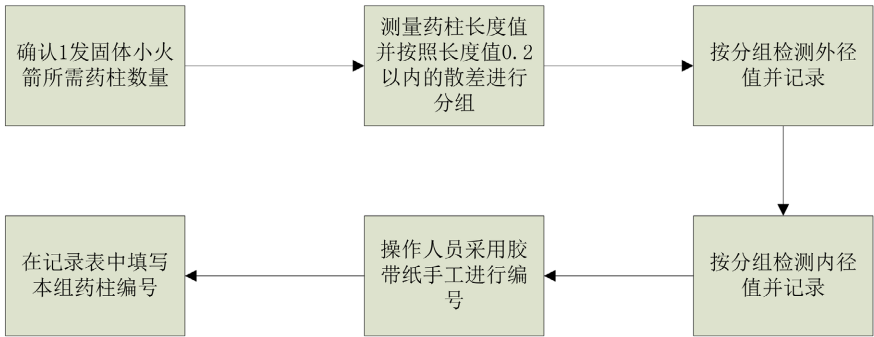


Figure 2. Flow chart of grain detection
图 2. 药柱检测流程图

目前，药柱检测过程中存在的工作量大、检测效率低、信息化手段落后等问题。

1) 工作量大。现阶段采用人工检测并对号记录方式, 其中检测并记录需两名操作人员配合完成, 同时记录工作繁复, 给操作人员带来较大工作量。

2) 检测效率低。现阶段采用人工方式检测药柱尺寸, 由于药柱会挥发出有毒有害气体, 长期操作容易造成操作人员头晕、恶心等症状, 故操作人员操作时需进行间歇性休息, 长时间的间断导致检测效率低, 遇有紧急任务时需进行突击, 不能满足未来批量生产需求。目前, 在双人配合操作的情况下, 每班能够完成 300 根药柱的检测。

3) 信息化手段落后。采用人工记录方式造成信息孤岛, 且填写及誊抄过程容易出现漏填、错填, 同时不利于信息共享及信息可追溯性。各种过程记录中的加工数据均存在于纸质记录上, 不利于后期的数据统计分析, 也不便于产品复查。

为提高药柱的检测能力, 降低药柱过程的安全风险, 开展药柱自动检测工艺技术研究, 实现药柱的自动检测及人机隔离, 降低操作人员劳动强度, 利用自动化手段来代替人工操作。

2. 固体小火箭药柱自动检测工艺参数研究

固体小火箭药柱自动检测装置主要用于实现药柱外圆、长度及内孔的自动检测, 若要实现药柱自动检测, 需确定相应的通用夹爪来夹持和转运药柱, 外径、长度检测所需的夹紧力, 内径检测所需的涨紧力。

2.1. 药柱转运通用夹爪夹持力的确定

要实现药柱的自动检测, 需采用机器人或机械手对药柱进行自动装夹, 而药柱为粘弹体类非金属件, 若夹持力过大可能会导致夹伤药柱, 夹持力过小会造成机器人在转运药柱时, 由于夹持力不够导致药柱因自身重力滑脱, 故需确定夹持力的大小。同时, 夹爪通用可实现药柱检测工装的通用。

通过分析, 选取了常用的双 V 型夹爪, 其结构如图 3 所示。

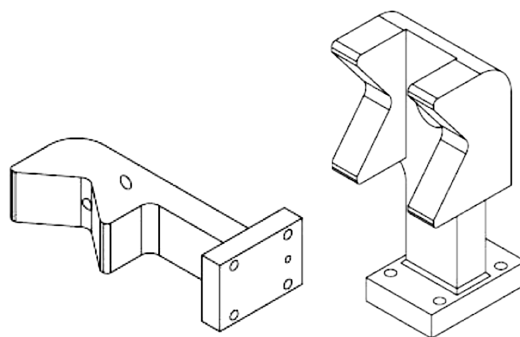


Figure 3. V-shaped gripper
图 3. V 形夹爪

通过计算及验证得出夹持力为 0.15 MPa, 即可夹紧药柱使得药柱被夹紧且变形量较小, 并能稳定转运。

2.2. 外径、长度检测所需的夹紧力

由 2.1 条已知, 药柱在 0.15 Mpa 时会使得药柱被夹紧且变形量较小, 本项目拟采用气缸作为外径及长度的执行机构, 故本项目外径及长度检测的压力可参考 2.1 条中已得出的结果。

2.3. 内径检测所需的涨紧力的确定

2.3.1. 检测方式的确定

现阶段, 尺寸检测主要分为接触式检测和非接触式检测两种方式。考虑到药柱检测的环境, 非接触

式检测由于对使用环境要求高及成本原因不适用于本项目，故本项目采用接触式检测方式。通过调研，拟采用数显球测量面内径千分尺，如图 4 所示。



Figure 4. Digital ball measuring surface inner diameter micrometer
图 4. 数显球测量面内径千分尺

该千分尺配合专用数据线，在不需软件的情况下，可使得检测值直接被采集并记录在 excel 表格中。使用时，通过调节位于尾部的旋钮使得内径千分尺测头伸出或收缩。该内径千分尺使用过程中允许检测的测头与药柱内孔不同心，最大偏差可达 10°，有效降低了内孔检测机构设计难度。此外，该内径千分尺测量精度为 0.006 mm，能满足使用要求。

2.3.2. 数显球测量面内径千分尺的集成

如图 5 所示，在装置集成时，千分尺放置在调整机构上，该机构可带动千分尺在上下左右方向进行手动调整，使得千分尺大致与药柱内孔同心，完成后锁紧调整机构。在千分尺检测环节的执行端，拟采用伺服电机带动位于千分尺尾部的旋钮转动，并通过工艺摸索，得出测头与药柱接触时的伺服电机扭矩值(使得测头与药柱接触，且不会将药柱内孔挤压变形的扭矩值)，到达扭矩值后直接停机并得出内径值。

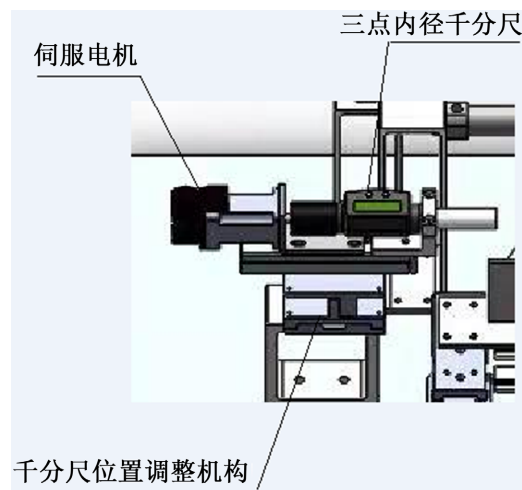


Figure 5. Integrated digital ball measuring surface inner
图 5. 数显球测量面内径千分尺集成

由于电机与药柱接触时会对药柱径向施加压力，由于药柱的粘弹体属性，若压力过大会导致药柱被挤压变形，造成测量不准确，需通过计算及试验，摸索出合适的压力，使得测量精度得到保证。

2.3.3. 千分尺对正药柱孔设计

如图 6、图 7 所示，在实际测量中，由于千分尺测杆与药柱存在间隙，在调整千分尺位置过程中，目测千分尺与药柱内孔平行的方式可能会造成一定误差，虽然允许内径千分尺球的测量面与药柱内孔存在 10° 的偏差，但偏差过大会造成药柱内孔尺寸的检测误差，为此，在每批检测前需考虑对千分尺进行位置进行简单校正。

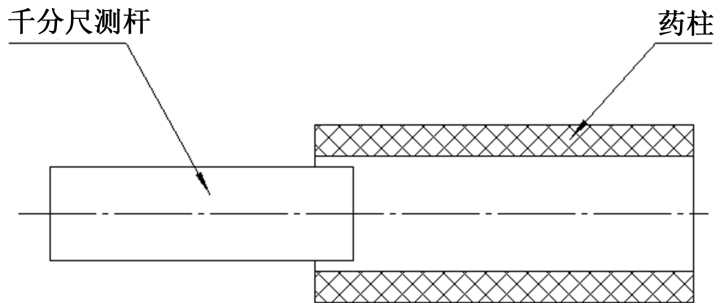


Figure 6. Ideal detection state
图 6. 理想检测状态

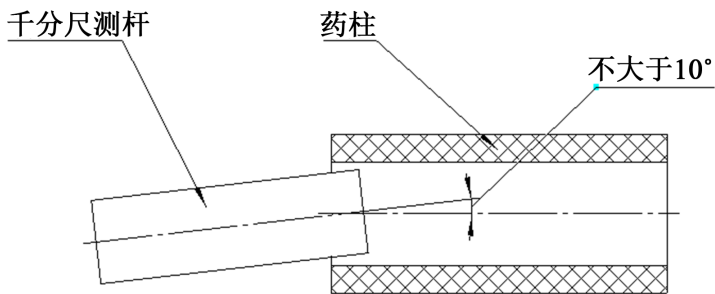


Figure 7. Actual detection state
图 7. 实际检测状态

在使用前，拟采用标准块确定千分尺测杆的位置，该标准块外径与待检测药柱保持一致，内径与测杆有不超过 0.5 的间隙。使用时，将标准块放置在 V 型槽待检测区，将千分尺测杆调整至能够自由深入标准块内径的位置，然后锁紧千分尺，即可开始测量。

2.3.4. 内径检测所需的涨紧力的确定

查阅以往去药柱生产厂家验收毛坯药柱提供的相关资料可得，常用的 HED-1 型药柱抗压强度为 3.41 MPa 以上、MTW-1 型药柱抗压强度为 4.9 MPa 以上、GHT-1 型药柱抗压强度为 6.36 MPa 以上。通常认为最软的 HED-1 型药柱，其抗压强度为 3.41 MPa 以上，本项目以最大的 HED-1 型药柱产品 1 作为研究对象进行计算。对采用三点内径千分尺检测内孔检测时的药柱进行受力分析，如图 8 所示。

由公式

$$F = A \times P$$

$$M = F \times d$$

其中 F 为药柱受到的压力； A 为三点内径千分尺测头与药柱内孔的接触面积，已知约为 3 mm^2 ； P 为 HED-

1 型药柱抗压强度 3.41 MPa; d 为产品 1 药柱半径 26.23 mm。

可得

$$M = A \times P \times d = 3 \times 10^{-6} \times 3.41 \times 10^6 \times 0.2623 \approx 2.69 \text{ N} \cdot \text{m}$$

即选型时电机的输出扭矩不大于 2.69 N·m 即可保证不顶伤药柱最软的 HED-1 类型的药柱。

按照气管 $\varphi 8$, 气压 0.15Mpa 进行了换算可得, 若采用电机作为检测的动力, 当电机输出扭矩为 0.12 N·m 时, 即可使得药柱内孔检测时不会因受压变形导致检测出的值不准确。

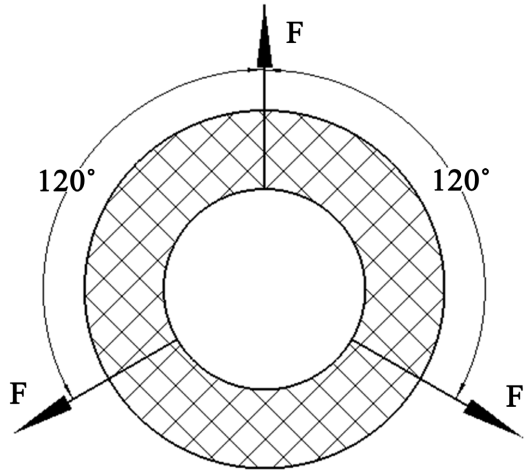


Figure 8. Stress analysis of inner hole detection in grain
图 8. 药柱内孔检测受力分析

2.3.5. 验证试验

试验目的: 摸索电机检测的输出扭矩值为 0.12 N·m 时, 与手工检测的差距。

试验方法: ① 采用 5 根产品 2 药柱进行试验, 在药柱孔口靠近端面处标记 3 个点, 3 个点间隔约 120°;

② 将电机输出扭矩调至 0.12 N·m, 尽量使得内径千分尺测头与之前在药柱端面标记的三点对齐, 然后电机带动三点内径千分尺进行药柱内孔检测, 记录两端共 2 组数据, 观察标记处内孔是否有顶伤痕迹;

③ 检测完成后, 采用人工进行复检, 每个内孔按标记点各检测 3 个点, 算平均值;

④ 对比两组数据的差异。

试验过程如图 9 所示。



Figure 9. Determination test of tension required for inner diameter detection
图 9. 内径检测所需的涨紧力的确定试验

试验数据如表 1 所示。

Table 1. Teat data

表 1. 试验数据

序号	试验件	电机检测		手工检测数据 D2 (mm)	误差%
		使用电机检测数据 D1 (mm)	是否有顶伤痕迹		
1	1#	20.22	否	20.23	-0.05
		20.24	否	20.23	0.05
2	2#	20.18	否	20.17	0.05
		20.15	否	20.16	-0.05
3	3#	20.26	否	20.23	0.15
		20.24	否	20.22	0.10
4	4#	20.20	否	20.21	-0.05
		20.20	否	20.23	-0.15
5	5#	20.25	否	20.23	0.10
		20.22	否	20.22	0
6	6#	20.26	否	20.22	0.20
		20.24	否	20.25	-0.05
7	7#	20.25	否	20.23	0.10
		20.29	否	20.24	0.25
8	8#	20.24	否	20.23	0.05
		20.26	否	20.29	-0.15
9	9#	20.22	否	20.24	-0.10
		20.27	否	20.24	0.15
10	10#	20.25	否	20.23	0.10
		20.26	否	20.23	0.15

备注 1: 相对误差定义为 $(D1 - D2)/D2 * 100\%$ 。

经验证, 0.12 N·m 的输出力矩能够使得药柱内孔检测时不会因受压变形, 剔除人工检测误差, 认为检测出的值较为准确。

2.3.6. 小结

通过对药柱内孔检测力进行计算及事实验证, 得出了最优的电机输出扭矩, 有效地指导了后续选型及装置的集成。

3. 固体小火箭药柱自动检测装置的设计

3.1. 整体布局及工艺流程设计

基于当前人工操作的流程，药柱检测主要包括长度检测、按照检测出的长度以 0.2 mm 差值进行分组、检测外径、检测内径等步骤。按照本项目要实现的技术目标，需避免断点环节以保障检测效率，合并药柱长度值、外径值及内径值检测工步，在一个工位上实现药柱长度值、外径值及直径值同步检测及自动分组，并按分组自动生成检测数据报表。同时，操作人员由 2 人减少至 1 人，单根药柱检测时间不超过 1 min。

要实现药柱的自动检测，减少 1 名操作人员的同时还需在 1min 内检测完成 1 根药柱，需对药柱的检测流程进行优化。其理想流程如图 10 所示。

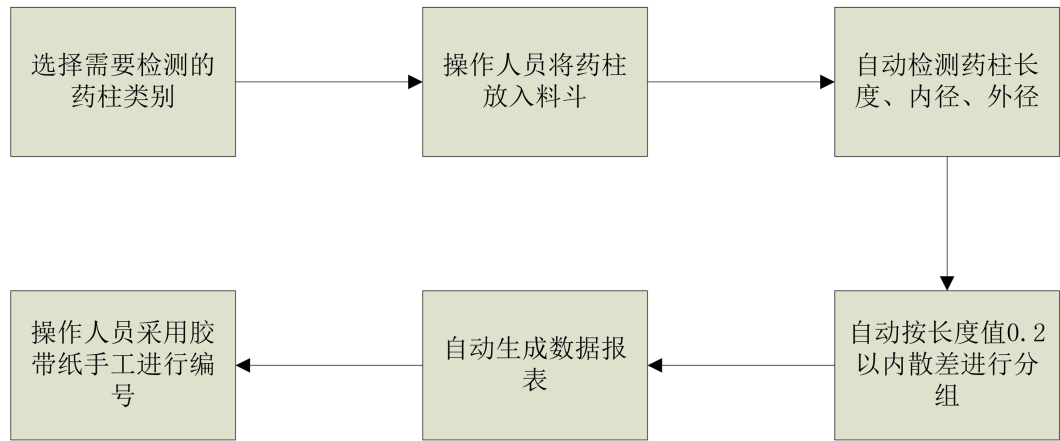


Figure 10. Optimized process
图 10. 优化后的流程

通过对药柱检测的整个流程进行优化，得出将药柱的长度、内径(两处)、外径(三处)在同一个工位进行检测，节约了操作及转运时间，其优化后的控制流程如图 11 所示。

3.2. 药柱自动检测工艺布局

根据上述研究结果，对药柱自动检测装置进行工艺布局设计，如图 12 所示。布局中将药柱检测部分集成在一起，即在 1 个工位完成所有尺寸的检测。此外，根据药柱需要进行分组的要求，根据药柱长度公差均为 $\pm 0.2\text{ mm}$ ，可设置以基准尺寸为基线，将高于基准线和低于基准线的药柱检测合格后，根据其长度分别放置于合格品 A 料盒、合格品 B 料盒。

通过对整体节拍进行测算，该布局能够满足 1 min/根药柱的检测需求。

根据以上研究及分析结果，设计并集成了药柱自动检测模块，详见图 13，该模块通过将长度、直径、内径检测集成在一起，实现了药柱尺寸的快速检测。

为了使上下料机构、检测机构、转运机构、产品存放区四个子系统协调工作，装置采用统一的控制系统，其控制系统的框图见图 14。

如图 15 所示，通过使用移动模组及上料机、下料盒，将药柱自动检测模块集成在一起，形成了药柱自动检测装置，实现了药柱的自动检测。

此外，在采用药柱自动检测装置检测药柱时，要求检验人员首件及每检测 50 件抽 1 件采用在有效计量周期内的游标卡尺(用于检测外径、内径)及高度尺(用于检测长度)进行复检，合格后再继续检测，从工

艺流程上避免了全批超差的风险。

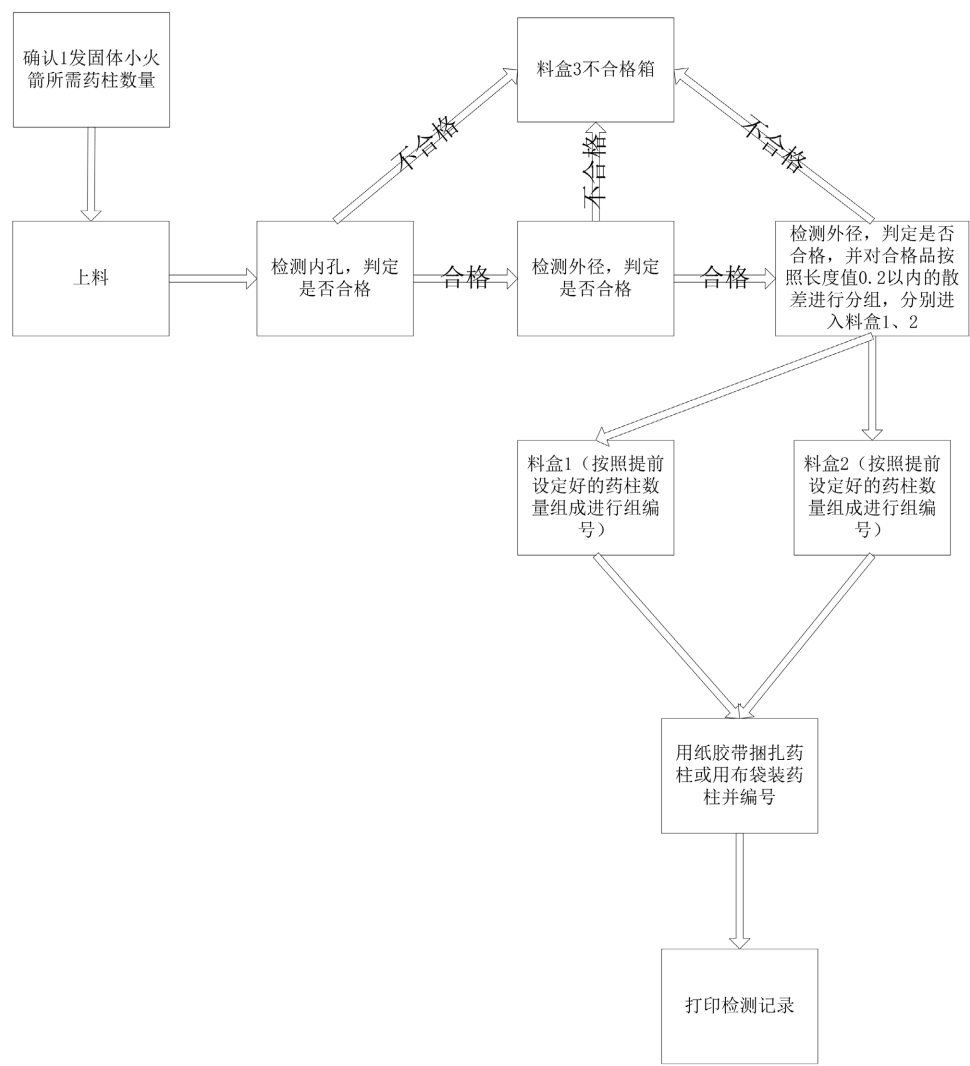


Figure 11. Optimized control process
图 11. 优化后的控制流程

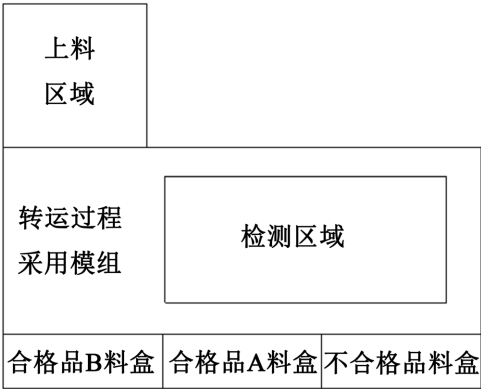


Figure 12. Overall layout diagram of automatic detection device for grain
图 12. 药柱自动检测装置整体布局图

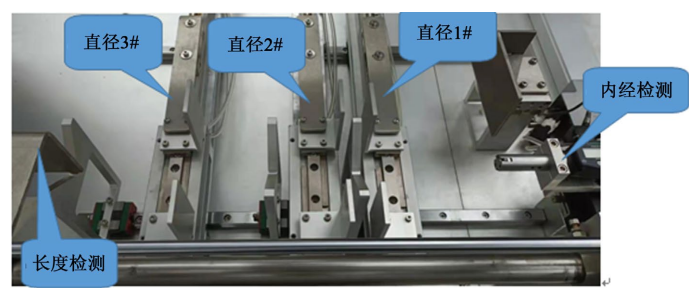


Figure 13. Detection module
图 13. 检测模块

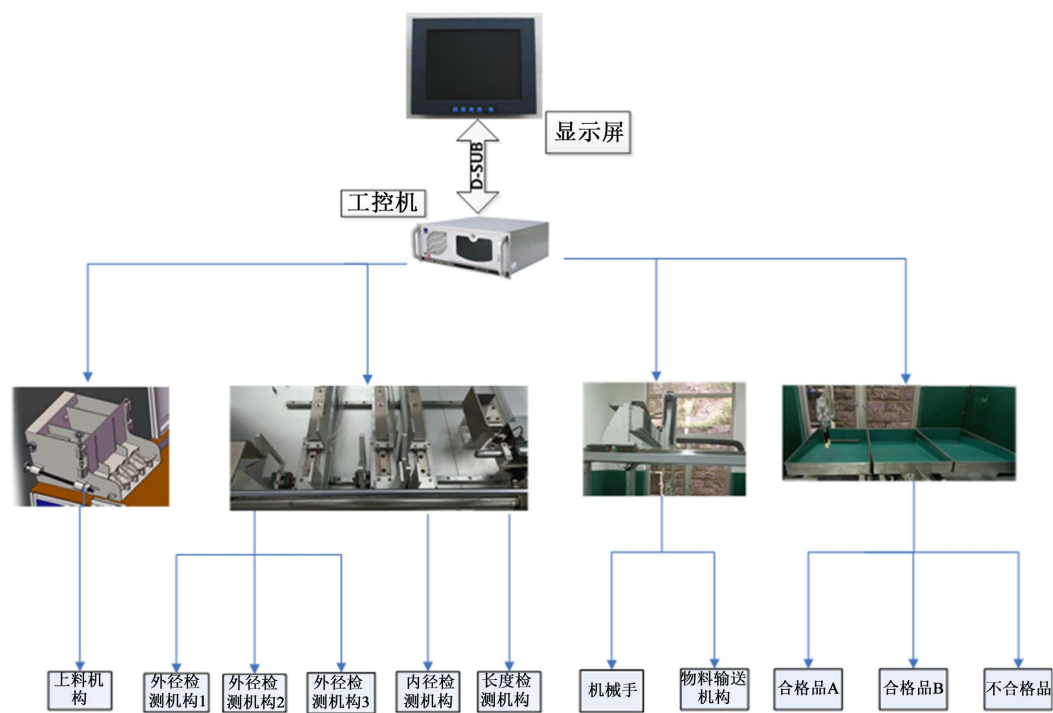


Figure 14. Block diagram of production line control system
图 14. 生产线控制系统框图

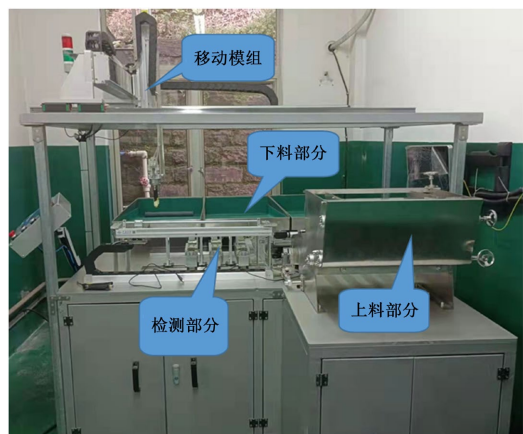


Figure 15. Physical picture of automatic detection device for grain
图 15. 药柱自动检测装置实物图

3.3. 数据记录的实现

如图 16 所示，在药柱自动检测装置中，上料完成后，操作人员只需输入待检测药柱的尺寸公差、批次号及产品代号后，在操作面板上点击“运行”即可实现自动检测。此外，使用该装置不需对不同类型的药柱尺寸设置相应的坐标，通过在程序中设置了长度及外径值后，模组会通过后台自动计算，夹持药柱的正中部位，避免了操作繁复。



Figure 16. Operation interface and panel diagram
图 16. 操作界面及面板图

3.4. 安全控制技术研究

出于药柱检测过程的安全防护要求，充分考虑了设备的整体安全性，从装置的机械防护、电气防护方面进行研究和设计开发。

3.4.1. 安全防护

药柱自动检测装置用于工厂火工区域，因此设备设计开发时从人机隔离角度对此类风险进行规避，具体措施如下：

1) 装置动作控制防护

整个自动检测过程中，各气缸及伺服电机运动过程平稳，精度高，配合控制系统的逻辑控制功能，装置设置了急停按键，当装置运行出现异常时，可直接按下急停按键实现瞬时停止检测。

2) 气压防护

设备运行压力为 0.2 MPa，空压机与装置之间均采用合格的气管作为连接，可承受最高 1.2 MPa 的高压，有效避免了高压气体产生的冲击。对气缸等易产生碰撞的运动部位，设置有总的进气安全调节阀，各气路均设置有调压阀进行限速减少运动冲击，如图 17 所示。

3.4.2. 机械伤害安全防护

药柱自动检测过程中存在机器人运动及压缩气体使用情况，若人员肢体在机器人运动路径上，或压缩气管脱落造成气体冲击，会对操作人员形成机械伤害，具体防护措施如下：

1) 人机隔离：设备运行过程中人员位于模组运动范围之外，有效地进行了隔绝。

2) 低气压设计：设备所需气源发生器空压机安装在室外，通过气管与设备连接，连接位置不处于人员操作位及通道上，且设备运行压力在 0.4~0.6 Mpa，能够避免高压气体产生的冲击伤害。



Figure 17. Device pressure regulating valve
图 17. 装置调压阀图

3.4.3. 电气安全防护

药柱自动检测装置位于二道溪药柱工房，检测过程的环境属于危险爆炸粉尘环境，按相关要求需对电气器件采取尘密防爆措施，具体如下：

1) 电气柜正压防尘：设备的控制器、电源和强电线路统一安装在机台下方，采用正压防尘方式进行防护，如图 18 所示。机台下方为钣金件，其接缝均具备密封垫，在机台下方柜体内设置了进气口和出气口，通过进气口通入干干净净的气体达到防止外部粉尘进入电气柜内部，并设置出口气使气体在电器柜内部循环，防止箱体内部温度过高。



Figure 18. Equipment electrical cabinet
图 18. 设备电气柜

2) 静电防护：设备各执行模块均为金属结构并接触或跨接导通，设备整体按照 GB3836.15-2000 要求可靠接地，能有效避免静电积累，防止静电火花的产生。

3) 其他：设备在操作面板的上方设置了物理急停按钮，当设备出现异常情况时可直接按下急停按钮实现瞬时工作停止，如图 19 所示。另一方面，设备顶部设置了故障报警信号灯，当装置出现异常情况，如缺料、称重超时及异常故障等，信号灯闪烁并发出报警音，设备停止运行。



Figure 19. Emergency stop button on the device operation panel
图 19. 设备操作面板急停按钮

4. 固体小火箭药柱自动检测工艺参数、控制参数数据库的实现

由于药柱的规格多, 为了实现药柱自动检测, 在控制系统中设计了固体小火箭药柱自动检测工艺参数和控制参数数据库, 并按药柱规格进行了分类, 方便随时调用程序, 实现了参数的规范化管理和信息化管理。

在药柱自动检测装置中，设置了两层数据采集装置，即底层数据及整理层数据。底层数据主要为对应批次号和药柱顺序号记录的 3 处外径值，2 处内径值及 1 处长度值。整理层主要为从底层提取的对应批次号和药柱顺序号的 1 处最大外径值、1 处最大内径值及 1 处长度值。在后台，将存放在 A、B 料盒的合格药柱检测数据分别记录，记录表如图 20 所示。



Figure 20. Data record table
图 20. 数据记录表

如图 21 所示,在药柱自动检测装置中,上料完成后,操作人员只需输入待检测药柱的尺寸公差、批次号及产品代号后,在操作面板上点击“运行”即可实现自动检测。此外,使用该装置不需对不同类型的药柱尺寸设置相应的坐标,通过在程序中设置了长度及外径值后,模组会通过后台自动计算,夹持药柱的正中部位,避免了操作繁复。

工艺及控制参数数据库,可按照工艺要求直接设定控制参数,并以产品编号保存在上位机,使用时,直接调用产品的代号对应的工艺和控制参数进行检测即可。各工艺及控制参数设定及监控界面如图 21 所示,固体小火箭药柱自动检测装置控制参数及工艺参数一览表如表 2 所示。

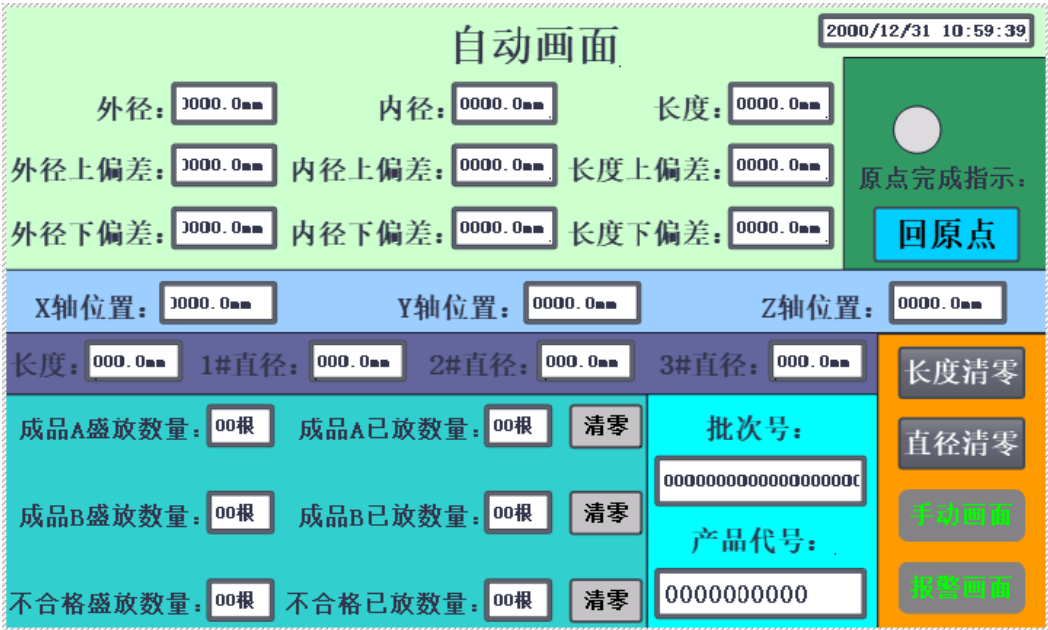


Figure 21. Setting and monitoring interface for various processes and control parameters
图 21. 各工艺及控制参数设定及监控界面

Table 2. List of control parameters for automatic detection device of solid small rocket grain
表 2. 固体小火箭药柱自动检测装置控制参数一览表

序号	参数名称	获取方式	备注
1	内径检测顶紧速度	通过编程控制器或控制软件系统设置	推荐速度为 20 mm/S
2	内径检测测头伸出	通过编程控制器或控制软件系统设置	推荐速度为 2 mm/S
3	出料输送模组运行速度	通过编程控制器或控制软件系统设置	推荐设定为 500 mm/S
4	送料输送模组运行速度	通过编程控制器或控制软件系统设置	推荐设定为 500 mm/S
5	取料机械手提升速度	通过编程控制器或控制软件系统设置	推荐设定为 166 mm/S
6	取料机械手下降速度	通过编程控制器或控制软件系统设置	推荐设定为 166 mm/S
7	取料机械手横移速度	通过编程控制器或控制软件系统设置	推荐设定为 600 mm/S
8	机械手夹持压力	通过压力调节阀调节	推荐设定为 0.15 MPa

5. 结论

本文通过对药柱自动检测过程进行梳理分析,以及对检测过程中所需的通用夹爪夹持力、外径、长度检测所需的夹紧力、内径检测所需的涨紧力进行理论分析和试验验证,设计了相应的自动化检测装置,对药柱进行自动检测,实现药柱的自动检测及人机隔离,降低操作人员劳动强度,提高药柱检测效率及信息化程度。开发出的药柱自动检测装置通过了计量,满足使用要求。通过 100 余批次产品检测验证,药柱平均测量时间为 1 min,每人每班可测量 400 根药柱,较原 2 人/班/300 根,效率提升了 2.5 倍以上。

参考文献

- [1] 刘竹生,王小军,朱学昌,等. 航天火工装置[M]. 北京:中国宇航出版社,2012.
- [2] 陈汝训. 固体火箭发动机设计与研究(上)[M]. 北京:中国宇航出版社,2005.
- [3] 王凯民. 火工品工程(下)[M]. 北京:国防工业出版社,2014.
- [4] 龙乐豪. 总体设计(中)[M]. 北京:国防工业出版社,2009.
- [5] 张书俊,任钧国,田四朋. 固体火箭发动机粘弹性药柱结构可靠性分析[J]. 固体火箭技术,2006,29(3): 183-185.