

doi: 10.7690/bgzdh.2023.01.008

霍尔里程计的设计与研制

程香平, 刘琦, 邱伊健, 张友亮, 胡强

(江西省科学院应用物理研究所, 南昌 330096)

摘要: 为解决 GPS 短时间信号失锁所造成的导航精度下降问题, 基于霍尔开关的原理和特点, 设计与构建车载霍尔里程计。根据对象齿轮的参数并结合磁路设计的仿真优化结果, 对磁钢外形和磁通量进行优化设计, 确定磁铁规格尺寸的选型。基于霍尔效应及感应理论和技术, 采用磁场有限元软件对磁场扰动进行仿真。优化结果表明: 在小于 4 mm 的距离范围内, 磁场扰动量均能得到有效识别, 提高车辆行驶里程计算的准确性, 使得霍尔里程计的抗电磁干扰及抗温漂能力大大提高。

关键词: 霍尔传感器; 里程计; 磁铁; 响应频率

中图分类号: TP212 **文献标志码:** A

Design and Development of Hall Odometer

Cheng Xiangping, Liu Qi, Qiu Yijian, Zhang Youliang, Hu Qiang

(Institute of Applied Physics, Jiangxi Academy of Sciences, Nanchang 330096, China)

Abstract: In order to solve the problem of navigation accuracy decline caused by GPS signal losing lock in a short time, a vehicle-mounted Hall odometer is designed and constructed based on the principle and characteristics of Hall switch. According to the parameters of the target gear and the simulation optimization results of the magnetic circuit design, the shape and magnetic flux of the magnet steel are optimized, and the size of the magnet is determined. Based on the Hall effect and induction theory and technology, the magnetic field perturbation is simulated by using the magnetic field finite element software. The optimization results show that the magnetic field disturbance can be effectively identified in the range of less than 4 mm, which improves the accuracy of vehicle mileage calculation and greatly improves the anti-electromagnetic interference and anti-temperature drift ability of Hall odometer.

Keywords: Hall sensor; odometer; magnet; response frequency

0 引言

近年来, 国内霍尔传感器的研发逐渐形成产业化^[1-3], 然而在智能化、集成化方面仍与国外存在较大差距, 促使国内学者在霍尔传感器技术方面展开大量研究。例如北京大学、清华大学等对投入了大量人力、物力、财力霍尔传感器技术和检测系统进行研究, 收获颇丰。罗志强等^[4-5]提出一种新的霍尔电流传感器温度补偿电路, 即采用三极管进行驱动电流补偿电路设计, 可更精确地进行温度补偿电路设计, 降低了电阻选择难度。王锋等^[6]提出霍尔传感器零位特性及补偿方法研究, 对误差成因特点及影响进行分析, 对感应零电势提出布线补偿和辅助补偿的方法。中国科学院微电子所和中国科学院大学都进行了霍尔传感器读出电路的相关研发, 提出使用斩波结构调节噪声及失调影响的方法, 最后将处理完成的输出信号通过 A/D 转换器转换为所需的数字码, 用于后续的分析处理^[7]。张玲娜等^[8]对采用恒压驱动的霍尔电流传感器温度补偿电路进行分析,

并对补偿电阻取值进行理论计算。此外, 在实现车联网系统中, 因车辆复杂的使用工况致使电源输出功率变化很大, 应用霍尔传感器作为电源系统的电流检测部件, 其作用是隔离检测电压系统的输出电流, 通过反馈系统对输出电流进行调节, 使输出功率不超过系统额定功率, 保护电源以防过载致其永久失效^[9]。随着霍尔技术的快速发展, 其抗电磁干扰及抗温漂能力大大提高, 价格也逐步下降。基于霍尔原理非接触式传感器取代电位计式位置传感器成为大势所趋, 越来越被广大汽车零部件厂商所重视。

1 总体设计思路

霍尔里程计在使用时, 为提高车辆行驶里程计算的准确性, 解决霍尔里程计的工作距离是设计的关键所在, 可从 2 方面来进行: 1) 采用高灵敏的磁传感器来感应磁场的扰动变化, 其能感应到磁场的微小变化, 有利于增大霍尔里程计的工作距离;

收稿日期: 2022-09-30; 修回日期: 2022-10-28

基金项目: 国家自然科学基金委(51865019); 江西省自然科学基金委(20201BBE51015)

作者简介: 程香平(1978—), 女, 河南人, 博士, 副研究员, 从事智能制造及新一代信息技术、流体动密封及表面工程技术、增材制造及 3D 打印工程技术研究。E-mail: 684268480@qq.com.

2) 根据对象齿轮的参数并结合磁路仿真结果,对检测需要使用的磁钢外形和磁通量进行设计,使得齿轮对磁场产生更大的扰动,提高霍尔里程计的工作距离。根据以上设计原则,采用有限元软件构建仿真模型,对传感器的磁铁规格、形状、尺度、轴间距进行仿真分析,对磁敏感元件进行选型;通过仿真分析,可解决轴距、磁铁与芯片中心的径向偏移、磁铁与芯片平行度对输出线性度的影响程度问题,磁铁规格尺寸的选型。

2 霍尔里程计的构建

霍尔里程计是将铁磁块安装在汽车的轮毂上作为整个磁场的转子,而将霍尔开关安装在车身后桥上作为静子。当霍尔开关处在较强的磁场范围内时,所产生的霍尔效应使得所连接的电路状态发生变化,从而输出脉冲信号,信号经过滤波器处理后被接入到单片机的中断输入口,然后经由单片机的中断服务程序对脉冲信号进行计数,利用转动的磁铁所产生的磁场变化将车轮的角运动量转换为霍尔开关的脉冲信号并由计算机记录,由其处理并通过解算获得车辆行驶的里程数据。

2.1 霍尔里程计的试制

为满足惯性组合导航系统中定位定向精度,并实现霍尔里程计的稳定性功能,在设计过程中根据车辆的实际状况采用背磁方案,即利用永磁体给霍尔传感器提供偏置磁场,并结合汽车底盘上铁磁材料齿轮的转动来实现脉冲信号的检测及输出。由图 1 可知,根据需求设计出的霍尔里程计由磁敏感元件、信号放大器、A/D 模数转换器、逻辑电路、调节电源、输出电路、铁磁体和外部壳体等组成。在磁敏感器的背面放置永磁体,正面对应着汽车底盘上传动机构中的齿轮,磁铁产生偏置磁场并将其提供给磁敏感器。如图 2 所示,当车辆行驶时齿轮开始转动,而其凸、凹齿则不断地交替出现并通过磁敏感器,对磁铁所产生的磁场分布造成一定的扰动。此时,磁敏感元件将磁场的扰动变量通过霍尔效应转换为电压变量,经信号放大器放大后由 A/D 模数转换器转变为数字信号,再由逻辑器件通过逻辑变换后输出 TTL 脉冲信号,并经由输出电路进行电平转换向定位定向系统输出符合电平要求的脉冲信号。

2.2 主要组成部件仿真设计

2.2.1 霍尔开关选取

霍尔开关作为磁电转换元件,其特性由磁输入

与电输出决定。磁输入一般包括单极、双极和交变磁场。因霍尔器件会在交变的磁场中产生磁涡流使霍尔电势受到影响,屏蔽的成本变高,故交变磁场不宜选择。在构建霍尔里程计时,要求磁铁极性保持不变,才可防止出现交变磁场。信号输出形式一般包括:1) 电压型 I: 上拉电阻内置,使用起来比较方便,但对其供电的电源有限制要求,例如选取规定电压的供电霍尔开关,其他电势的电源就不能供电;2) 电压型 II: 集电极采用开路的形式,对供电电源的要求具有一定的灵活性,可在输出端与供电电源间外接出上拉电阻,只要改变阻值就可与相应额定电压的电源对接;3) 差分电流输出型,是一种固定电源的方法,抗干扰能力最好。信号输出电路如图 3 所示。

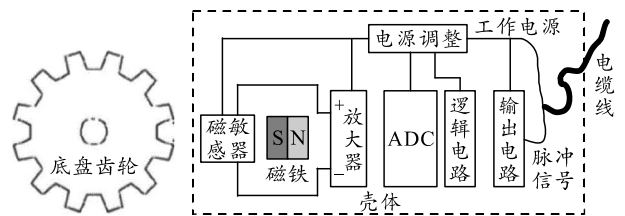


图 1 霍尔里程计组成

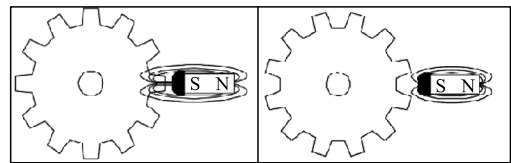


图 2 齿轮对磁场的扰动

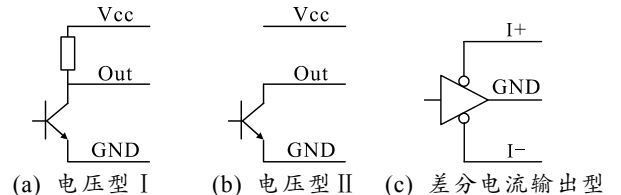


图 3 信号输出电路

霍尔器件的输出电路形式选取后,接收端电路也可基本确定。为排除干扰,接收端采用光耦进行隔断,故对上图中(a)和(b)形式信号输出电路需查清其输出电流,若大于可对光耦进行直接驱动,若小于可采用三极管或者总线驱动器来提高输出电流。驱动电路的供电可直接利用采集计算机或配加电源,无需增加额外电源模块即可防止干扰。根据具体的使用要求,最终选取霍尔开关的内部组件包括电压调整器、差分放大器、霍尔传感器、集电极开路输出及施密特触发器等。

2.2.2 磁铁

铁磁体用来给磁敏感器提供所需的偏置磁场,

对转动齿轮进行相应的磁化，可使得齿轮的凸、凹齿对磁场产生不同程度的交替磁场扰动。齿轮材料选取 20CrMnTi 钢、模数为 6.5、齿数为 30、齿根直径为 $\Phi 193.4$ ，传动齿轮按标准设计，齿厚约为 7 mm，齿间距约为 15 mm，齿深 14 mm。根据已知数据，利用相关软件进行磁路仿真模拟，根据最佳仿真结果，磁铁设计尺寸为 $\Phi 10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ 的圆柱体，采用轴向充磁、材料为钕钴磁材料，磁表面可产生约 350 mT 磁通量，可以耐 300 °C 高温，满足霍尔里程计的应用要求。

选好磁铁后，需要将磁铁安装在汽车后轮上，首先将后轮拆除，在轮毂的内侧进行划线定位，其定位精度小于 0.4°，将磁铁粘固在轮毂上，通过增加安装永磁体的数量，各磁铁与车轮转轴始终保持同时转动，从而获得稳定的磁感应强度，可有效提升霍尔里程计的测量精度。磁铁安装完毕后，在车后轮后桥或附件部位处安装霍尔开关，像板簧、后减震器与后桥连接处均可安装。先根据空间位置的大小制作出托架，再将托架安装在后桥附件上，最后装上霍尔开关。将车轮进行转动，使得霍尔开关的敏感端与轮毂的距离要小于最大敏感间距。

2.2.3 磁传感器

磁传感器采用进口霍尔传感器，电路设计采取惠斯通全桥结构模式，当垂直于芯片的磁场随齿轮的转动受到干扰而发生变化时，输出的差分电压信号也随之产生变化。选取的磁传感器温度范围为 -40~150 °C，响应频率可达到 15 kHz，具有较高的灵敏度、低功耗、温度稳定性好等优点。如图 4 所示，磁传感器含有逻辑电路，由数据采集、滤波、极值保持和回滞比较等功能模块组成。

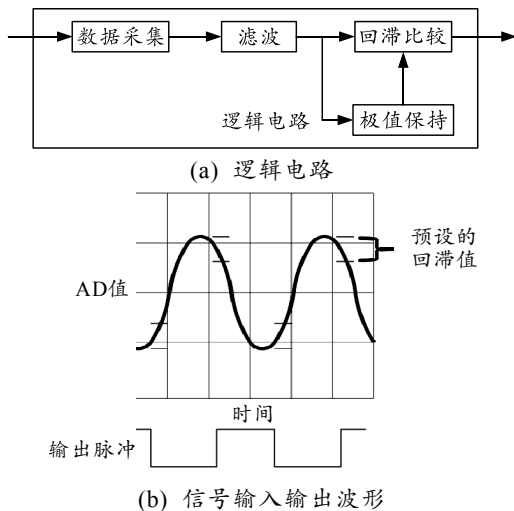


图 4 逻辑电路

上图(a)中，首先将数据进行采集再通过滤波处理后，经由极值保持模块维持当前极值，再由回滞比较器根据当前极值、回滞值和采集的数据进行逻辑判断，判断依据：当前极值为极小值时，若采集值不断上升，直至超过预设回滞值则输出电平翻转；当前极值为极大值时，若采集值持续减小，直至减到回滞值则输出电平翻转。该逻辑电路的信号输入输出波形如图 4(b)所示，与传统比较电路产生的脉冲相比，具有更好的自动适应输入信号幅度变化的能力，能够始终保持信号占空比为 50%左右。逻辑电路与比较电路输出如图 5 所示。

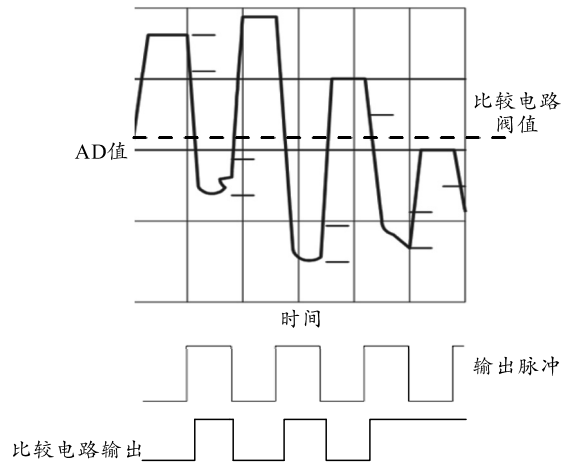


图 5 逻辑电路与比较电路输出的比较

2.3 信号电路的设计

车载组合定位/定向系统在工作时必定会受到外界环境的干扰，周围磁场发生变动可使得霍尔里程计信号输出时发生微小扰变。为避免温度与外界磁场等的干扰，利用差分输入的方式进行调制，可将信号进行多倍放大。信号电路如图 6 所示，采用 2 个霍尔器件，减弱外界温度与周遭磁场对其造成的干扰，可有效提高霍尔里程计的无接触检测距离。

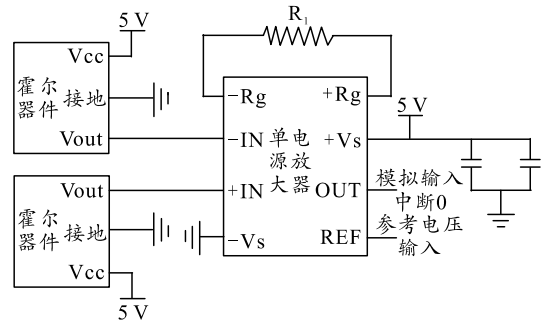


图 6 信号电路

2.4 可靠性设计

平均无故障工作时间 MTBF 的数学式表达：

$$MTBF = \sum (\text{downtime} - \text{uptime}) / \text{failuretimes} \quad (1)$$

霍尔里程计通常是配套应用于车载导航系统，根据产品组成和技术特点，建立串联可靠性模型，并对产品各功能模块进行可靠性指标分配，具体如表 1 所示。根据分配结果，里程计的总失效率为 $25.47 \times 10^{-6} \text{h}$ ，据此计算平均无故障工作时间 MTBF 为 39 264 h，满足目标值 $\geq 20\,000 \text{h}$ 的技术指标要求。

表 1 可靠性指标分配

序号	项目	失效率 $\times 10^{-6}/\text{h}$	通用 质量系数	数 量	总失效率 $\times 10^{-6}/\text{h}$
1	磁传感器	3	1.0	1	3
2	输出电路	0.5	1.0	1	0.5
3	电感器	1	0.6	1	0.6
4	电阻	0.001 7	0.3	9	0.004 59
5	电容器	0.002 1	0.2	12	0.007 56
6	半导体 分立器件	0.007 7	0.7	4	0.006 16
7	连接器	0.5	0.7	1	0.35
8	防水圈	1.0	1.0	2	2.0
9	结构件	1	1.0	1	1
合计					25.47

为提高霍尔里程计可靠性指标，采取以下措施：

- 1) 选用汽车级芯片；
- 2) 结构件用经过钝化处理的 316 L 不锈钢，使其在海洋环境下不易生锈；
- 3) 输出电缆采用专用岛礁电缆，可满足海洋使用环境；
- 4) 产品采用全密封结构，密封材料具有耐高温特点，可满足涉水要求；

5) 选用冗余度较大的元器件，并对元器件进行降额设计和热设计，所选用元器件均经过老化筛选，以消除元器件早期失效。

试制样机累计通电时间达到 500 h；样机通过温度、湿度、低气压、浸渍等单机试验中均符合要求；在振动、冲击等系统中测试，样机工作正常。综合分析，霍尔里程计满足可靠性指标要求。

3 设计的霍尔里程计主要性能分析

3.1 响应频率

设计霍尔里程计采用直流耦合电路。电路中，前后级的静态工作点是相互关联、彼此影响。前级集电极电位与后级基极电位相同，而前级集电极电阻又与后级基极偏流电阻一致，导致前后 2 级工作点交互影响、联动牵制。在放大电路中，任意参数发生变化，像电压的升降波动、元器件的老化及各参数随温升的变动等都会出现零点漂移，且以第 1 级漂移所受影响为最大，因漂移会被其后的各级逐步放大。这种电路具有良好的低频特点，可对信号

进行缓慢放大，能更好地将电路集成在一块硅片上，相应地减小霍尔里程计的体积。磁传感器响应频率最大可达 15 kHz，输出变换电路带宽设置为 8 kHz。利用 MAXWELL 软件对磁场扰动进行仿真，在已知的齿轮材料和参数条件下，齿轮转速对磁场的扰动量在高速时更强。综上所述，霍尔里程计的响应频率满足 0~5 kHz 响应频率的设计要求。

3.2 检测距离

利用 MAXWELL 软件对磁场扰动进行仿真，按已知磁钢设计参数和已知齿轮设计参数，约束磁传感器距离磁钢表面 0.3 mm，设置磁传感器距离齿轮表面 σ 分别为 1、2、3、4、5、6 mm 进行仿真，仿真结果如图 7 所示。由图可知，磁敏感距离齿轮表面越近，磁场扰动量就越大，最大的扰动量将达到 ± 40 ，但当大于 4 mm 时，磁感应的扰动量较小，几乎处于同一条水平线上，难以检测出来。即在小于 4 mm 距离范围内，磁场扰动量均能得到有效识别，在此工作距离范围内工作正常。通过仿真齿轮的齿宽、齿深及齿轮与磁阻芯片的测量间距对传感器磁场分布的影响，在设计齿轮转速传感器时，可测出齿轮和永磁体最优的相对大小关系。另外，永磁体与磁阻芯片放置相对位置的偏差，将使得磁阻芯片工作的磁场区间存在一定的偏置，故不同敏感芯片设计的齿轮转速传感器的输出特性也不同。

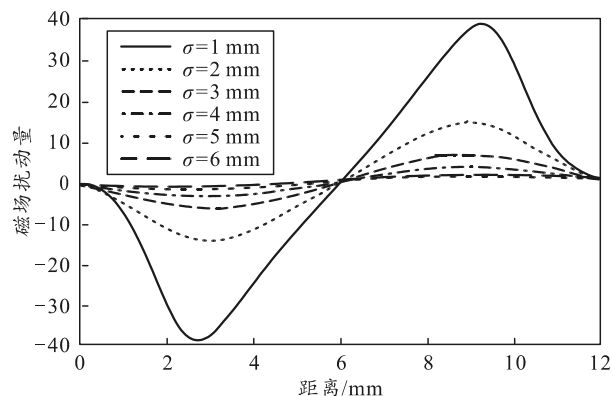


图 7 检测距离与磁通道关系仿真

3.3 功耗

在试验检测过程中，需向霍尔里程计提供的最大功率为 2 W，里程计主要的消耗功率为 $P = P_1$ (磁传感器) + P_2 (电源电路) + P_3 (输出电路)。磁传感器在工作电压为 24 V 的条件下，最大工作电流为 6 mA，消耗功率 P_1 为 0.144 W。霍尔里程计采用线性电源，在最大工作电源 DC35 V 条件下，其消耗的功率 P_2 为 0.396 W。输出电路设为全导通，此情况下最大

功率为 P_3 , P_3 为 0.055 W (35 V, 静态电流 1 mA, 10 mA 输出电流)。最大的总功率 P 为 0.595 W, 满足设计功率小于 2 W 要求。

4 结论

1) 基于霍尔接近开关设计的原则进行选取, 选取抗干扰能力较好的霍尔开关。

2) 根据对象齿轮的参数并结合磁路设计的仿真优化结果, 对检测需要使用的磁钢外形和磁通量进行优化设计, 使得齿轮对磁场产生更大扰动, 通过仿真分析, 解决轴距、磁铁与芯片中心的径向偏移、磁铁与芯片平行度对输出线性度的影响程度问题, 磁铁规格尺寸的选型。

3) 基于霍尔效应及感应理论和技术, 采用磁场有限元软件对磁场扰动进行仿真, 在小于 4 mm 距离范围内, 磁场扰动量均能得到有效识别, 即在此工作距离范围内工作正常。通过仿真齿轮的齿宽、齿深及齿轮与磁阻芯片的测量间距对传感器磁场分布的影响, 在设计齿轮转速传感器时, 可测出齿轮和永磁体最优的相对大小关系。

(上接第 25 页)

1) 经仿真与试验的对比分析, R_{50} 均值相对误差均值为 4%, 小于立靶密集度测试规程中 15% 的要求, 说明人枪系统虚拟样机符合设计目标; 试验结果显示 6° 软枪托相对于原枪托 R_{50} 精度提高了 20.3%, 验证了枪托结构参数的改变对射击精度有重要影响。

2) 通过对人枪系统中枪托不同结构参数的研究, 为改善枪械系统优化提供新的技术途径和方法, 改善人枪系统在射击时的相互影响, 从而为达到理想的射击精度提供新思路。

参考文献:

[1] HATCHINGT D, RATHEA E. Study of Man-Weapon reaction forces application to the fabrication of a standard rife fixture[R]. AD: A034523, 1975.

[2] 薛钧. 刚柔耦合系统发射动力学特性的仿真分析[D]. 南京: 南京理工大学, 2008.

[3] 李永新. 人枪相互作用模型与实验研究[D]. 南京: 南京理工大学, 1993.

参考文献:

[1] HENRY P B, RADIVOJE S P. Integrated semiconductor magnetic field sensors[J]. Proceedings of the IEEE, 1986, 74(8): 1107-1132.

[2] RADIVOJE S P. Hall effect devices[M]. 2nd Ed. Bristol: institute of physics publishing, 2004: 42-43.

[3] RAMSDEN E. Hall effect sensors[M]. 2nd Ed. Oxford: elsvier, 2006: 35.

[4] 罗志强. 试论单片机技术在电气传动系统的应用[J]. 计算机工程应用技术, 2016, 12(22): 172-174.

[5] 罗志强, 沈军, 金华敏. 分布式 DNS 反射 DDoS 攻击检测及控制技术[J]. 电信科学, 2015(10): 1-6.

[6] 王峰, 张旭隆, 曹言敬. 有源电力滤波器在煤矿电网中的应用[J]. 煤炭技术, 2019(9): 172-174.

[7] LIU K, ZHANG R W, DU Z K, et al. A low cost readout and processing circuit for integrated CMOS geomagnetic sensors[J]. 015 IEEE 11th International Conference on ASIC, 2015: 1-4.

[8] 张玲娜. 基于霍尔传感器的电机转速测量与调速系统设计和研究[D]. 西安: 西安石油大学, 2016.

[9] 李泽勇, 王文生. 闭环霍尔电流传感器在车用电源系统中的应用[J]. 电子元器件应用, 2004(5): 25-26, 35.

[4] 包建东. 人-枪相互作用试验研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2006.

[5] 王缘, 王亚平, 徐诚. 射击全过程典型步枪人枪作用特性研究[J]. 北京理工大学学报, 2020, 40(11): 1168-1173, 1189.

[6] 包建东, 王昌明, 孔德仁, 等. 人枪运动对射击精度影响的实验研究[J]. 仪器仪表学报, 2006(S2): 1274-1276.

[7] 宋杰, 廖振强, 李佳圣, 等. 卧姿有依托人枪系统建模与仿真分析[J]. 南京理工大学学报, 2014, 38(4): 457-463.

[8] 王彦平, 党建滨. 人/枪系统建模和射击精度预估[J]. 弹道学报, 1992(4): 50-55.

[9] 王亚平, 徐诚, 郭凯. 人枪系统建模及数值仿真研究[J]. 兵工学报, 2002(4): 551-554.

[10] 国家技术监督局. 中国成年人人体尺寸: GB10000-88[S]. 北京: 中国标准出版社, 1989: 9.

[11] 中国人民解放军第三十一试验训练基地枪械性能试验方法: GJB3484-98[S]. 北京: 中国人民解放军总装备部, 1998: 7.