

doi: 10.7690/bgzdh.2019.07.020

小口径智能弹药发射高过载环境下弹载模块电路应力分析

于亚飞, 李忠新, 吴志林

(南京理工大学机械工程学院, 南京 210094)

摘要: 针对小口径智能弹药发射时弹载元器件极易发生损坏失效的问题, 对其高过载环境下弹载模块电路应力进行分析。设计弹药弹载电路模块的防护结构, 采用 HYPERMESH 与 ABAQUS 软件建立弹丸和刚体滑膛身管的有限元模型, 得到弹载电路的应力分布, 计算不同防护外壳厚度下弹载电路模块的应力响应, 并对聚氨酯、丙烯酸、硅酮和环氧树脂等灌封材料进行有限元数值仿真。该分析可为后续弹丸弹载模块的设计提供参考。

关键词: 小口径; 智能弹药; 电路模块; 高过载; 灌封材料

中图分类号: TJ410.2 **文献标志码:** A

Analysis on Stress for Circuit Module Under Launching High Overload Environment in Small Caliber Smart Bullet

Yu Yafei, Li Zhongxin, Wu Zhilin

(School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science & Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: Aiming at the problem of damage and invalidation of projectile-borne circuit module when launching small caliber smart bullet, focus on the analysis of the stress of the circuit module at the high overload environment. Designed a protection structure for projectile-borne circuit module, use HYPERMESH and ABAQUS to establish finite element model of the bullet and the rigid slippery barrel, calculated the stress distribution of the circuit module. Analyzed the stress response of the circuit module under different protective shell thickness and 4 kinds of potting materials: polyurethane, acrylic acid, silicone and epoxy resin. The results can provide a reference for the design of projectile-borne circuit module.

Keywords: small caliber; smart bullet; circuit module; high overload; potting material

0 引言

现代战争对弹药射击精度提出了更高要求, 同时伴随着集成电路和 MEMS 技术的发展, 发展智能弹药成为弹药发展的重要方向之一^[1]。弹丸的发射是高过载冲击强振动过程, 在这种恶劣环境下弹载元器件极易发生损坏失效, 使智能弹药失去作用。最常用保护弹载电子器件方法包括隔振缓冲及灌封防护技术、电子电路和结构设计、加固技术等。

梁增友等^[2]设计了泡沫铝与薄壁金属管复合结构缓冲器, 利用 LS-DYNA 软件分析计算了结构缓冲器降低弹载设备的效能。尹威华等^[3]采用利用 iSIGHT 与 ABAQUS 的联合仿真优化, 对弹载测试电路模块在火炮发射过程进行建模仿真并分析了其应力分布状况, 对缓冲防护模块进行了结构参数优化。V Chakka 等^[4]建立了弹丸和身管的有限元模型, 设置弹载电子设备为质量块, 利用有限元软件 LS-DYNA 进行仿真分析, 为减少弹载电子设备的失效提出措施。焦敏等^[5]采用有限元软件 LS-DYNA 仿真得到灌封层的密度、弹性模量以及粘性等材料

参数对弹载电子器件的响应。靳书云等^[6]采用高强度钢外壳作为第 1 级防护, 薄壁金属管填充泡沫铝作为第 2 级防护, 通过有限元法和 LS-DYNA 软件仿真得到了在高冲击环境下记录仪的工作可靠性。鲍爱达等^[7]利用 ANSYS/LS-DYNA 对记录仪各防护单元进行了数值模拟仿真, 得出各防护单元失效的临界冲击加速度值。

现有文献对电子设备的防护研究大多是炮弹、导弹等大口径弹药, 对小口径弹药弹载元器件的防护研究还很少: 一是小口径智能弹药对弹载元器件的尺寸要求很高, 因为弹丸本身口径小, 给弹载电路预留的空间小; 二是小口径智能弹药初速要求高, 发射时弹丸需要承受膛内高过载作用, 弹载电路模块同样需要承受膛内高过载环境。笔者基于一种小口径智能弹药, 通过 HYPERMESH 和 ABAQUS 软件对弹丸、身管和弹载电路模块进行数值仿真, 并通过改变弹载元器件防护外壳厚度和不同灌封层材料, 对比分析弹载元器件在膛内的应力响应, 为后续弹丸弹载模块的设计提供参考依据。

收稿日期: 2019-03-14; 修回日期: 2019-04-27

作者简介: 于亚飞(1993—), 男, 河南人, 硕士, 从事火炮、弹药工程和自动武器研究。E-mail: 1263650241@qq.com。

1 弹载电路模块的有限元分析

1.1 几何模型

笔者基于一种 12.7 mm 小口径智能弹药，包括弹体结构、制导和控制机构、执行机构、能源机构等。采用滑膛发射，弹丸尾翼稳定。弹托用来保障弹体在膛内的发射安全性，出膛后自动脱落。弹丸结构如图 1 所示。

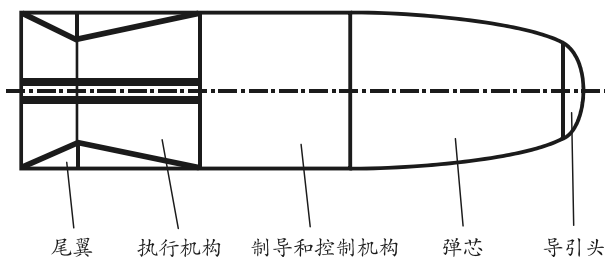


图 1 智能弹丸结构

由于弹丸尺寸和电子器件的尺寸限制，弹载电子器件采用如图 2 所示的防护结构^[3]，由电路板、灌封层和高强度金属外壳组成。弹丸发射时受到火药气体压力的冲击，在膛内运动时处于高过载环境下。为了保护恶劣环境下功率芯片和引线接点不会断裂失效，目前大都对电路模块采用真空灌封强化处理。灌封层材料一般具有良好的缓冲吸能特性^[8]，能对在高冲击环境下的电子元器件起到保护作用。高强度金属外壳主要是用来保护电子器件，使其与弹体外部或内部其他零件隔离开，保证电子模块不发生塑性形变从而遭到破坏。

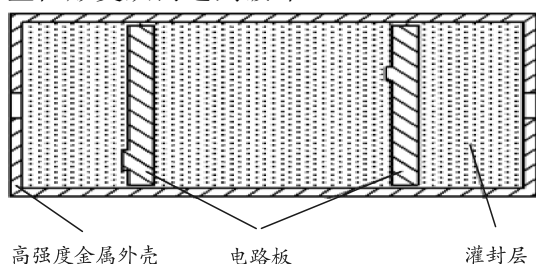


图 2 弹载电路模块

1.2 网格模型

将建立的弹丸模型导入到前处理软件 HYPERMESH 软件进行网格划分，建立弹丸和电路板网格模型如图 3、4 所示，采用八节点六面体网格，共划分 276 456 个网格单元，其中电路板 21 637 个单元。弹丸采用滑膛发射，在膛内的受力非常复杂。为了更好地模拟弹丸在膛内的运动，建立了无膛线的身管模型。为了简化计算，在 ABAQUS 中设置成刚体约束，共划分身管 420 000 个网格单元如图 5 所示。

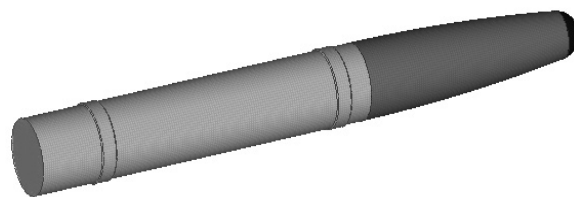


图 3 弹丸网格模型

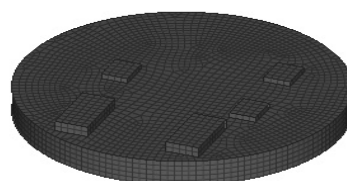
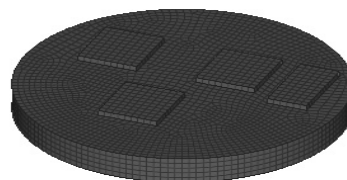


图 4 电路板网格模型

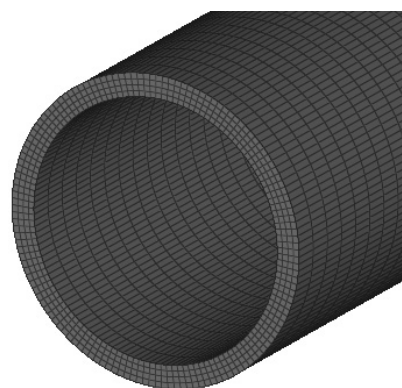


图 5 刚体身管网格模型

1.3 材料模型

弹体采用铝合金，弹芯采用钨合金，电路板模块外壳采用高强度钢，灌封层材料选择环氧树脂。弹丸受到火药气体压力作用在膛内运动，受到短时间的强烈冲击，导致弹体材料无法采用理想弹塑性模型。笔者对弹体、弹芯和电路板模块外壳采用 Johnson-cook 材料模型，其他部件采用理想弹塑性材料模型。Johnson-cook 材料模型应力由以下公式^[9]给出：

$$\sigma_{eq} = (A + B\varepsilon_{eq}^n)(1 + C \ln \dot{\varepsilon}_{eq}^*) (1 - T^{*m})$$

式中： A, B, n, C, m 为模型参数； σ_{eq} 为等效应力； ε_{eq} 为等效塑性应变； $\dot{\varepsilon}_{eq}^*$ 为无量纲化等效塑性应变率， $\dot{\varepsilon}_{eq}^* = \dot{\varepsilon}_{eq} / \dot{\varepsilon}_0$ ， $\dot{\varepsilon}_0$ 为参考应变率， $\dot{\varepsilon}_{eq}$ 为实验中的应变率； $T^* = (T - T_r) / (T_m - T_r)$ 为无量纲化温度， T_0 为参考温度

(一般为室温), 取作 293 K, T_0 为材料的熔点温度, T 为实验温度。

数值模拟过程中涉及材料参数见表 1。表中 ρ, E, ν 分别为密度、弹性模量和泊松比。弹体、弹芯和电路模块外壳 Johnson-cook 材料参数见表 2。

表 1 数值模拟各部件材料参数

部件	E / GPa	$\rho / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	ν
身管	204.0	7 850	0.29
电路板	22.0	1 730	0.28
灌封层	3.2	1 570	0.36
弹体	72.4	2 780	0.33
高强度外壳	200.0	7 800	0.30
弹芯	350.0	17 000	0.28

表 2 Johnson-cook 材料参数

部件	A / MPa	B / MPa	n	m	T_m / K	T_r / K
弹体	269	684	0.73	1.70	795	293
外壳	1 500	2 600	0.82	1.05	1 800	293
弹芯	1 506	177	0.12	1.00	1 723	293

1.4 有限元数值模拟

设置身管为刚体模型。火药气体压力是其承受的主要动载荷。将建立的网格模型导入到 ABAQUS 中, 在弹底施加如图 6 所示的膛压曲线。各部件接触面之间定义为绑定约束, 定心部和身管之间设置为通用接触, 单元类型采用 C3D8R 缩减积分单元, 提交给 ABAQUS/EXPLICIT 显示求解器进行求解计算, 发现电路板在膛压的作用下, 最高处于大约 100 000g 的高过载环境下。电路板的应力云图如图 7 所示。由图可知: 应力集中出现在功率芯片边缘以及 PCB 基片边缘, 这是在直角过渡的地方, 一旦出现芯片瑕疵或者灌封缺陷, 极易产生应力集中, 使芯片失效或者 PCB 基片断裂, 是需要重点防护的区域。图 8 是最大应力处的应力时间变化曲线。由图可知: 电路板的最大应力出现在膛压最大值附近, 在弹丸发射开始时刻, 电路板的应力迅速增大, 到达最大膛压附近时, 应力也达到峰值, 之后随着膛压的下降电路板应力有所下降, 但是降幅不是很大。电子系统的零件细小, 结构复杂, 如果电子器件的应力过大, 极有可能造成连接器的导线断裂、芯片失效、PCB 基片断裂等问题, 使整个弹载电路失去作用。

计算得出在最大膛压时, 电路板的最大应力为 138.6 MPa, 小于电路板屈服强度 240 MPa, 采用图 2 的保护结构可以实现电路模块处于弹性变形阶段, 这种外壳保护结构可以有效保护电路模块。

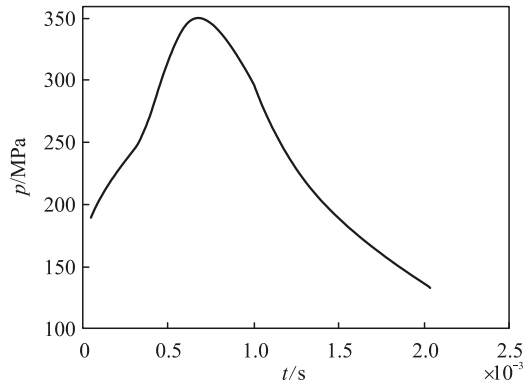
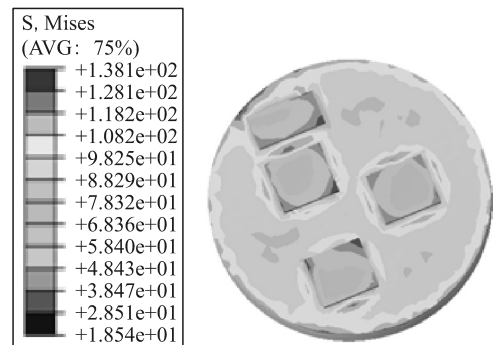
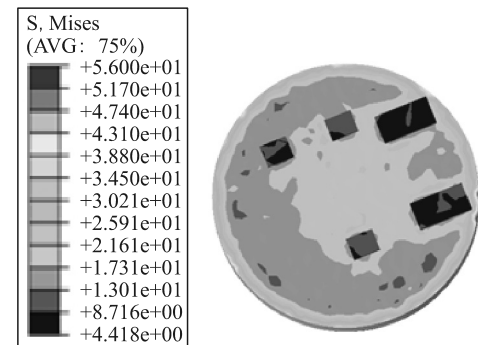


图 6 弹底膛压加载曲线



(a) 电路板 1



(b) 电路板 2

图 7 电路板应力云图

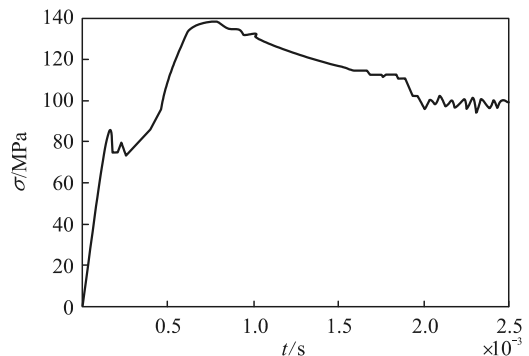


图 8 电路模块峰值应力处应力-时间曲线

2 外壳厚度防护分析

为了指导弹丸弹载模块防护结构的设计, 现对不同厚度外壳进行数值仿真, 对比分析不同厚度壳

体对电路模块的峰值应力的影响。选取 0.4、0.5 和 0.6 mm 3 种不同壳体厚度，对不同厚度外壳下的电路模块进行腔内动力学仿真，得到不同防护壳体厚度防护下电路板的应力时间变化曲线如图 9 所示。由图可以看出：随着外壳厚度的增加，电路板的应力逐渐减小，厚度 0.5 mm 时，峰值应力为 138.6 MPa；厚度 0.4 mm 时，峰值应力为 166 MPa，增加了 19.7%；厚度 0.6 mm 时，峰值应力为 124 MPa，降低了 10.5%。但是考虑弹丸尺寸限制，外壳厚度也不宜过大：一是厚度越大，保护机构质量越大，会影响到弹丸内各零部件的质量分布；二是厚度太大，会减小弹载电路板的尺寸，本来就苛刻的体积，对弹载电路板的尺寸设计提出了更高的要求。

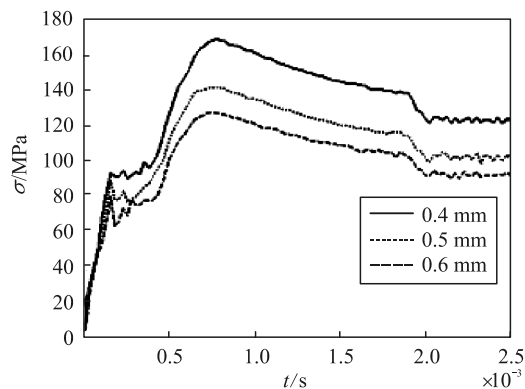


图 9 不同厚度外壳下电路模块应力-时间曲线

3 不同灌封层材料防护分析

灌封材料是为了保护恶劣环境下如潮湿、化学品、气体中的功率芯片和引线接点，同时为导体间提供了额外的绝缘保护，以防止电压过高^[10]。弹载电子元器件处于强振动和高冲击的恶劣机械环境。作为电子元器件的直接保护层，灌封材料不仅要有良好的机械强度，为封装和端子提供机械支撑，而且还要具备良好的吸能特性减弱到达电子器件的应力波。目前，常见的灌封材料主要有硅酮、环氧树脂、聚氨基甲酸乙酯和丙烯酸。笔者针对这 4 种灌封材料进行了有限元数值仿真。4 种材料采用弹性模型，外壳厚度取 0.5 mm。用于数值模拟的材料参数见表 3。计算得到 4 种灌封材料下电路模块的应力时间变化曲线如图 10。

表 3 4 种灌封材料的材料参数^[10]

材料	E / GPa	$\rho / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	ν
硅酮	2.21	1 590	0.36
环氧树脂	3.20	1 570	0.36
聚氨基甲酸乙酯	34.50	1 100	0.42
丙烯酸	2.40	1 180	0.35

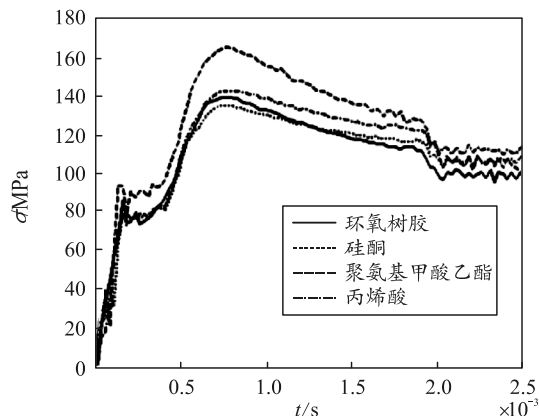


图 10 不同灌封层材料电路板应力时间曲线

由图可知：聚氨基甲酸乙酯电路模块应力峰值为 4 种材料中最大，为 164 MPa，高于环氧树脂 18.3%。其余 3 种材料电路板峰值应力相差不大。灌封层为硅酮时，电路模块应力峰值为 134 MPa；灌封层为环氧树脂时，峰值应力为 138.6 MPa；灌封层为丙烯酸时，电路模块应力峰值为 142 MPa。

丙烯酸灌封材料耐腐蚀性差、耐磨性差、机械强度低，持续工作温度只有 80~100 °C，且材料性质呈热塑性，一般不是元器件灌封材料的较好选择。聚氨基甲酸乙酯、硅酮和环氧树脂都是热固性材料，广泛应用于高发热的功率芯片，但硅酮热膨胀系数高、刚度大、机械强度低，作为要承受高冲击高过载环境的智能弹药灌封材料时，会引起长期可靠性问题；聚氨基甲酸乙酯和环氧树脂都具有良好的耐湿性、耐磨性和耐化学腐蚀性、机械强度和电特性，而且环氧树脂成本低，固化温度区间大。综合条件下，环氧树脂是元器件灌封材料的首要选择，其次是硅酮和聚氨基甲酸乙酯，最后是丙烯酸，但是在实际封装中一般不会选择丙烯酸树脂^[10]。

4 结论

笔者采用 HYPERMESH 和 ABAQUS 软件，对含有电子元器件的小口径弹丸在腔内高过载环境下的动力学响应进行数值仿真，在不同防护外壳厚度和不同灌封层材料下，对比了弹载元器件的应力响应，得出结论：

1) 弹载电路模块的峰值应力大多集中出现在功率芯片边缘，以及 PCB 基片边缘这些直角过渡的地方。

2) 弹载电路保护结构外壳厚度越大，弹载电路模块的峰值应力越小；厚度为 0.4 mm 时，峰值应力增加了 19.7%；厚度为 0.6 mm 时，峰值应力降低

了 10.5%，因此在保证电路板尺寸的情况下，可以适当增大防护外壳厚度。

3) 4 种灌封材料，聚氨酯甲酸乙酯防护下峰值应力高于环氧树脂 18.3%，丙烯酸和硅酮防护下峰值应力与环氧树脂比较接近，但是综合考虑材料的特性和发射环境，应选择环氧树脂作为灌封层的首选材料，其次是硅酮和聚氨酯甲酸乙酯，最后是丙烯酸树脂。

参考文献：

[1] 刘国庆. 狙击弹丸/枪相互作用问题研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2015.

[2] 梁增友, 邓德志, 吴鸿超, 等. 泡沫铝与金属管复合结构降低弹载设备过载效能研究[J]. 兵工学报, 2016, 37(S2): 1-7.

[3] 尹威华, 杨国来, 葛建立, 等. 弹载测试电路模块缓冲防护结构设计及优化[J]. 火炮发射与控制学报, 2016,

37(3): 56-60.

[4] CHAKKA V, TRABIA M B. Modeling and reduction of shocks on electronic components within a projectile[J]. International Journal of Impact Engineering, 2008, 35(11): 1326-1338.

[5] 焦敏, 陈小伟, 阮朝阳, 等. 灌封材料对弹载电子器件的防护仿真研究[J]. 兵工学报, 2014, 35(S2): 51-56.

[6] 靳书云, 靳鸿, 张艳兵, 等. 弹载加速度数据记录仪抗高冲击设计[J]. 传感技术学报, 2014(4): 463-466.

[7] 鲍爱达, 陈员娥, 李长龙, 等. 弹载加速度记录仪在冲击环境下的失效研究[J]. 振动与冲击, 2013, 32(13): 182-186.

[8] 吴晓莉, 张河. 高冲击下电子线路灌封材料的缓冲机理及措施研究[J]. 包装工程, 2004, 25(1): 44-46.

[9] JOHNSON G R, COOK W H. A constitutive model and data for metals subjected to large strains[C]//high strain rates and high temperatures, 1983: 541-548.

[10] SHENG W W, COLINO R P. Power Electronic Modules Design and Manufacture[M]. Crc Press, 200.

(上接第 85 页)

5 结论

笔者分析了滑翔再入飞行器的弹道特性，通过简化的再入段运动学方程，建立平衡滑翔条件下的弹道参数与速度、升阻比的解析关系，通过解析关系仿真验证了平衡滑翔条件下的射程、高度、速度、升阻比等之间的关系。跳跃滑翔弹道则普遍存在，速度以及射程特性上也略差于平衡滑翔弹道。从能量转化的角度，得出了再入高度对射程影响不大的结论。再入飞行器凭借大升阻比气动外形，按照满足平衡滑翔条件的高度、速度、弹道入射角进行滑翔可以显著增大飞行距离。笔者提出的弹道特性研究方法未考虑高空飞行的操控能力、防热设计等，但在工程初期总体参数论证时仍具有参考意义。

参考文献：

[1] 卢宝刚, 傅瑜, 崔乃刚. 基于拟平衡滑翔的数值预测再入轨迹规划算法[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2015, 47(1), 14-19.

[2] 李瑜, 杨志红, 崔乃刚. 助推-滑翔导弹弹道优化研究[J]. 宇航学报, 2008, 29(1), 66-71.

[3] 梁巨平, 周韬, 周浩. 再入飞行器平稳滑翔可达区域计算分析[J]. 兵器装备工程学报, 2018, 39(5): 112-116.

[4] 胡锦涛, 张晶, 陈万春. 高超声速飞行器平稳滑翔弹道解析解及其应用[J]. 北京航空航天大学学报, 2016, 42(5): 961-968.

[5] 贾沛然, 陈克俊, 何力. 远程火箭弹道学[M]. 长沙: 国防科学技术大学出版社, 1993.

[6] BREDT S, IRENE. The Silver Bird Story[J]. Spaceflight, 1973, 15: 166-181.

[7] 陈小庆. 高超声速滑翔飞行器机动技术研究[D]. 武汉: 国防科学技术大学, 2011.

[8] 瞿章华, 刘伟, 曾明. 高超声速空气动力学[M]. 长沙: 国防科技大学出版社, 2011.

[9] 阮春荣. 大气中飞行的最优轨迹[M]. 茅振东, 译. 北京: 宇航出版社, 1987: 30-35.

[10] 刘欣. 助推-滑翔式飞行器弹道设计与制导技术研究[D]. 武汉: 国防科学技术大学, 2012.

[11] 胡锦涛, 陈万春. 高超声速飞行器平稳滑翔弹道设计方法[J]. 北京航空航天大学学报, 2015, 41(8): 1464-1475.