

箭载电子设备供电接口统一化研究

张金刚, 王星来, 吴燕茹, 徐力, 王刚

(北京宇航系统工程研究所, 北京 100076)

摘要:针对我国现役运载火箭供配电系统的设计体制,对箭载电子设备供电接口的设计分别从工作电流、接插件种类、线路接点等方面进行统计,从统计特征上分析电子设备供电接口的现状,进一步通过对典型接口设计电路的理论分析,归纳影响因素,定义了影响因子,提出供电接口统一化设计的思路和方法,并给出统一化设计要求和建议。

关键词:运载火箭; 供配电; 供电接口; 产品化

中图分类号: V475.1

文献标志码: A

文章编号: 2096-4080(2017)02-0020-06

Research on Unification of Power Supply Interface on Launch Vehicle Devices

ZHANG Jin-gang, WANG Xing-lai, WU Yan-ru, XU Li, WANG Gang

(Beijing Institute of Astronautical Systems Engineering, Beijing 100076, China)

Abstract: According to the design of power supply and distribution system in launch vehicle of our country, the working current, the connector type and the connection point of electronic equipment power supply interface was analyzed statistically in this article. Furthermore, the typical design method was discussed, influencing environments and influencing factor were concluded. Therefore, the unification design method and suggestion of power supply interface was put forward in this article.

Key words: Launch vehicle; Power supply and distribution; Power supply interface; Production

0 概述

我国现役运载火箭电子系统普遍采用 28V 直流供电体制,箭上电子设备一般通过单独的供电接口从母线取电^[1]。由于现有的产品设计规范和要求的更多的针对功能、性能指标的设计,对于供电接口的设计更多依靠设计师的经验^[2],缺乏从供配电系统的角度形成对设备接口的统一设计规范或要求,造成电子设备 28V 一次供电接口的设计主观性较大,结果是设备接口种类较多,要求不一。一方面设备接口的复杂增加了系统设计的复杂性,对供电的可靠性带来隐患;另一方面接口类型的不同

一,使得与之相关的系统电缆接口、转接盒、转接电缆、测试台等测试产品的数量大大增加,使得产品及系统成本增大,同时难以进行批量采购、生产,不利于产品货架的建立。

本文通过对箭载电子设备的供电接口进行统计学分析,总结经验 and 特点,从系统总体的角度提出设备供电接口统一化设计的思路和方法,为电子设备的产品化设计提供参考。

1 箭载电子设备供电接口现状分析

对我国现役火箭中使用的 114 台电子设备为样本进行统计分析,发现其选用的供电接口类型达到

了 94 类。没有系统条件进行约束的话,各设备供电接口的选型与设计主观性较大,难以形成一致的标准。本文通过对样本供电电流(功耗)、电连接器类型、正负母线接点分配等多角度的分析,从统计学上分析现役火箭电子设备供电接口的特性。

1.1 按供电电流分析

对 114 台设备样本的供电电流按 0A~0.5A、0.5A~1A、1A~2A、2A~3A、3A~4A、>4A 分成 6 档,统计特征如表 1 所示。从统计特征可以看出,箭载电子设备大多属于小功耗设备,工作电流在 0.5A 以内的占了 57%,工作电流大于 4A 的大功率设备仅占 2%。

为反映大多数电子设备的用电特性,便于开展供电设计,按 0A~2A、2A~3A、>3A 进一步进行分类统计。可以看出 0A~2A 的用电设备属于绝大多数,占了 91.3%,2A~3A 和 >3A 分别各占 4.4%,总体来看 0A~3A 以内的用电设备占到了 95.7%。

表 1 箭载电子设备供电电流分析

Tab. 1 Analyses of supply currents

供电电流	数量/台	百分比/%	数量/台	百分比/%	
0A~0.5A	65	57.0			
0A~2A	0.5A~1A	24	21.1	104	91.3
	1A~2A	15	13.2		
2A~3A	5	4.4	5	4.4	
>3A	3A~4A	3	2.6		
	>4A	2	1.8	5	4.4

1.2 按电连接器类型分析

尽管 114 台样本具体选用的电连接器型号差异较大,但从电连接器所属的规格类型来看还是有明显的统计特征的,对样本在 0A~2A、2A~3A、>3A 工作电流段的条件下,按所用电连接器的规格类型进行统计,如表 2 所示。可以看出 J14 系列矩形电连接器是使用最广泛的接插件,占到了样本总数的 68.4%;Y11 系列圆形和 J599 系列圆形连接器数量次之,分别占到样本总数的 12.3%、7.0%;J30J 系列占 4.4%;CX2 系列、Y8C 系列以及 J36 系列使用较少,分别占 3.5%、2.6% 和 1.8%。

表 2 箭载电子设备供电接口电连接器类型统计

Tab. 2 Analyses of electrical connectors for supply interface

接插件类型	J14 系列	Y11 系列	J599 系列	J30J 系列	CX2 系列	Y8C 系列	J36 系列
0A~2A	70	14	8	4	3	3	1
2A~3A	4	0	0	0	1	0	0
>3A	4	0	0	1	0	0	0
总计/台	78	14	8	5	4	3	2
百分比/%	68.4%	12.3%	7.0%	4.4%	3.5%	2.6%	1.8%

1.3 按线路接点分析

正负母线线路接点的分配主要与产品的工作电流以及冗余设计等可靠性相关的措施有关,一般电流越大,分配的接点越多,对可靠性要求越高,冗余的接点越多。电子设备正负母线接点一般成对使用,最少分别用 2 个点做正、负母线接点,最多用到了 4 个点,也有不规则的非成对使用等特殊应用情况。

对样本在 0A~2A、2A~3A、>3A 工作电流段的条件下,按母线接点进行统计的结果见表 3。

表 3 箭载电子设备母线接点分类统计

Tab. 3 Analyses of connecting points on supply bus

母线接点	2 正 2 负		3 正 3 负		4 正 4 负		其他
	数量	占比	数量	占比	数量	占比	
0A~2A	42	40.4%	32	30.8%	6	5.8%	3
2A~3A	0	0	4	80%	0	0	1
>3A	0	0	2	40%	3	60%	0

可以看出在 0A~2A 工作电流时,大量采用了 2 正 2 负,其次是 3 正 3 负的接点分配方法;在 2A~3A 供电电流时,绝大多数采用 3 正 3 负的接点分配方法;在 >3A 的供电电流时,多数采用了 4 正 4 负,其次是 3 正 3 负的接点分配方法。

2 箭载电子设备供电接口统一化设计

2.1 箭载供电线路理论模型

设供电母线电压为 U_0 ,用电负载即设备输入端电压为 U_1 ,供电距离为 L 。供电传输线一般由平行

导体构成,可看作均匀传输线^[3],供电线路的等效电路模型如图1所示,图中参数定义为:

R_0 ——两根平行导线每单位长度具有的电阻,单位为 Ω/m ;

L_0 ——两根平行导线每单位长度具有的电感,单位为 H/m ;

C_0 ——每单位长度两根导线之间的电容,单位为 F/m ;

G_0 ——每单位长度两根导线之间的电导,单位为 S/m ;

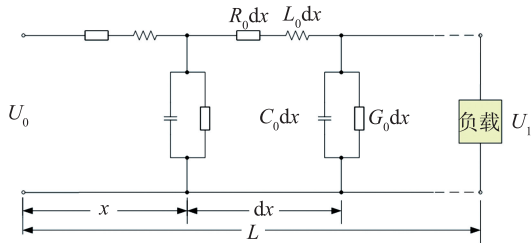


图1 供电设计等效电路模型

Fig. 1 Equivalent circuits of power supply design

对一段无穷小的长度元 dx ,设在 dx 左端的电压和电流为 u 和 i ,根据均匀传输线的偏微分方程^[4]有:

$$\left. \begin{aligned} -\frac{\partial u}{\partial x} &= R_0 i + L_0 \frac{\partial i}{\partial t} \\ -\frac{\partial i}{\partial x} &= G_0 u + C_0 \frac{\partial u}{\partial t} \end{aligned} \right\}$$

可见负载的实际电压、电流受线路导线的电阻、电感以及导线间的电容、电导影响。由于单位长度的电导率代表了两导体之间流动的传导电流,考虑火箭选用导线的绝缘方式,该电流将会非常小,因此 G_0 值可以忽略。且目前火箭供电体制通常为 28V 直流,考虑稳态情况,在火箭常规供电距离内, C_0 、 L_0 值较小,可以忽略。设系统设计的线路允许压降损耗为 ΔU ,对上述偏微分方程进行积分,则应满足:

$$-(U_1 - U_0) = \int_0^L R_0 i dl \leq \Delta U \quad (1)$$

供电接点或线路一般采用冗余设计,设供电线路的冗余度为 m ($m \geq 1$),定义为当供电线路出现 m 个点或 m 根线断开时,供电线路仍能保持其设计功能。若供电线路为 N 点 N 线(供电接点为 N 正 N 负,正、负接点各采用 N 根导线连接),则令 $n = N - m$,定义为线路设计度,设 I 为负载稳态工作电流,则式(1)变为:

$$I \times \frac{R_0 \cdot L}{n} \leq \Delta U$$

即:

$$L \leq \frac{n \cdot \Delta U}{I} \times \frac{1}{R_0} \quad (2)$$

2.2 箭载供电接口设计影响因素分析

从公式(2)可以看出,箭载电子设备供电接口的设计不仅受本身工作电流的影响,而且和安装位置、供电母线的距离、供配电系统设计的允许压降、供电线路的直流电阻值等相关,而供电线路的直流电阻又取决于导线规格以及线路设计度,影响因素较多,可以归纳出如图2所示的影响因素图。

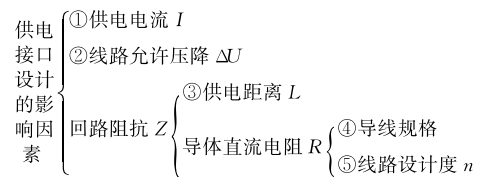


图2 箭载供电接口设计影响因素

Fig. 2 Influence factors for the design of power supply interface

从图2中可以看出,如何在众多的因素中,找出对供电接口设计的直接影响关系,简化初次设计时的影响变量,对减少设计方案的迭代次数,提高供电系统的设计效率,具有重要意义。

2.3 供电接口的系统设计思路

从系统工程的角度考虑,供电接口的设计包括供电线路设计、电连接器设计两个方面,涵盖供电电压、电流、供电距离、允许压降、导线规格、线路设计度、电连接器选型等多个设计要素,需要结合实际箭载环境综合考虑。

2.3.1 供电线路型统一化设计

一般情况下当供配电系统方案确定之时,即系统的电池、设备供电指标等分解设计完成之后,线路允许的压降即确定下来了,为了便于分析,设:

$$\mu = \frac{n \cdot \Delta U}{I} \quad (3)$$

定义为影响因子,则公式(2)变为:

$$L \leq \mu / R_0 \quad (4)$$

根据国内导线电缆生产厂使用手册及以电缆和元器件降额的相关标准,可以得到航空航天供电线路常用导线(C55A系列)的性能指标,如表4所示,对于供电电缆一般不推荐使用截面积小于 0.2mm^2 的导线。

表 4 供电线路常用导线性能指标

Tab. 4 Performance of commonly used wires

序号	线规号 AWG	导线截面 积/mm ²	直流电阻 /(Ω/100m)	额定电 流/A	备注
1	24	0.2	8	3.3	导线直流 电阻值采用 不同类型导 线时有所差 异, 本文取 一般均值
2	22	0.35	5	4.5	
3	20	0.5	3	6.5	

根据导线规格将表 4 中的百米长度电阻值统一量纲后代入公式 (3), 可以得出如表 5 所示的线路选型表。为便于应用, 转化为如图 3 所示的箭载供电线路统一化设计选型图。

表 5 供电线路选型表

Tab. 5 Selection table for power supply lines

序号	线规号 AWG	$L \leq \mu/R_0$	备注
1	24	$L \leq 12\mu$	
2	22	$L \leq 20\mu$	
3	20	$L \leq 33\mu$	

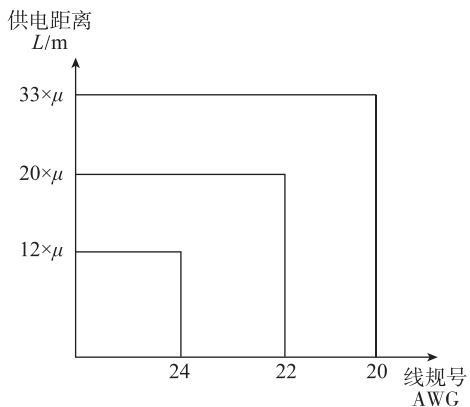


图 3 供电线路统一化设计选型图

Fig. 3 Unified design table for power supply lines

供电线路统一化选型图将众多的接口设计影响因素整合为以影响因子表征的供电距离与导线规格之间的关系, 借助直观的二维坐标图, 实现供电线路的准确设计。设计选型图使用方法为:

- 1) 根据传输允许压降损耗 ΔU 、线路设计度 n 、供电电流 I 计算影响因子 μ 值;
- 2) 根据图 3, 在供电长度 $L \leq 12\mu$ 时, 可以选用线规号为 24 号的导线; 在供电长度 $L \leq 20\mu$ 时, 可以选用 22 号导线; 在供电长度 $L \leq 33\mu$ 时, 可以选用 20 号导线。

例如, 某电池电压设计指标为 $(28.5 \pm 2.5) V$,

一次用电设备工作电压为 $(28 \pm 3) V$, 为保证一次用电设备在极端供电情况下的正常工作, 传输路径的压降损耗应不大于 1V, 按冗余度为 1, 线路设计度为 2 的三点三线供电方式, 供电电流 1A, 根据式 (3), 可以得出:

$$\mu = \frac{n \cdot \Delta U}{I} = \frac{2 \times 1}{1} = 2$$

按照图 3, 得出在供电距离 $12\mu = 24m$ 范围内选用 24 号导线, 供电距离 $20\mu = 40m$ 范围内选用 22 号导线, 供电距离 $33\mu = 66m$ 范围内选用 20 号导线。

2.3.2 电连接器统一化设计

电连接器的选型设计需综合考虑机械性能、电性能和环境适应性^[5], 并且应从系统总体上考虑所选导线规格、电连接器的接线孔直径、额定电流、接触件规格、连接工艺等性能或使用指标。

根据供电接口电连接器统计现状, 并结合目前现役火箭实际使用情况, 在满足箭载机械及环境适应性的条件下, 选用 J14T-9ZJ、J14C-9ZJ、Y11P-1210ZJ、J599/20FC98PN-H 等 4 型连接器作为供电接口的统一化优选接口类型, 其电气及总体性能指标如表 6 所示, 推荐使用焊接连接工艺。

表 6 统一化选型电连接器性能指标

Tab. 6 Performance of electrical connectors for uniform selection

连接器 型号	接触件 直径/mm	额定电 流/A	接线孔直 径/mm	最大适配 导线线规 /AWG	备注
J14T-9ZJ	0.8	3	0.6	24	
J14C-9ZJ	1	5	0.7	22	
Y11P-1210ZJ	1	5	1.4	20	
J599/20FC 98PN-H	1	7.5	1.1	20	

2.3.3 供电接口统一化设计要求

根据第 2 小节的统计分析结果, 可知供电电流 0A~3A 的用电设备达到了 95.7%, 箭载供电接口的统一化设计要求针对此类设备为主进行分析。

按照供电接口设计影响因素的分析及供电线路统一化设计选型图, 取 $\Delta U = 1, i = 1$, 即传输允许压降损耗为 1V, 线路冗余度为 1, 在 N 点 N 线线路条件下, 线路设计度 $n = N - 1$, 在一定工作电流范围内, 对导线规格的选择、供电线路接点的设计、影响因子、供电距离的综合分析计算, 形成如表 7 所示的箭载供电接口的统一化设计要

求,为减小偏差,表中工作电流按每0.5A为一档,要求说明如下:

1) 工作电流为0A~3A的箭载电子设备供电接口优先并统一选用J14T-9ZJ电连接器;

2) 工作电流>3A的箭载电子设备参考本设计要求,根据具体情况设计,不做统一要求;

3) 根据适用的供电距离,当不满足使用要求时,按照表7根据适用的供电距离选用J14C-9ZJ、Y11P-1210ZJ、J599/20FC98PN-H等型电连接器;

4) 在满足设计要求的条件下,尽量选用供电线路点线数较少、导线规格号较大(导线截面积较小)的方案,以减少电缆网质量;

5) 当选用导线类型与本文所用导线直流阻值均值相差较大时,应根据本文推导公式重新计算设计选型图以及影响因子,进而完成电连接器选型。

表7 供电接口统一化设计要求

Tab. 7 Uniform design requirements for power supply interface

工作电流 /A	导线规格 (AWG)	供电线路 (N点 N线)	影响因子 / μ	供电距离 /m	单机端电连接器推荐类型	备注
0~0.5	24#	2	2	≤ 24		
		3	4	≤ 48	J14T-9ZJ	
		4	6	≤ 72		
0.5~1	24#	2	1	≤ 12		
		3	2	≤ 24	J14T-9ZJ	
		4	3	≤ 36		
	22#	2	1	≤ 20		
		3	2	≤ 40	J14C-9ZJ Y11P-1210ZJ	
1~1.5	24#	4	3	≤ 60		
		2	0.7	≤ 8		
		3	1.3	≤ 16	J14T-9ZJ	
	22#	4	2	≤ 24		
		3	0.7	≤ 14	J14C-9ZJ Y11P-1210ZJ	
1.5~2	24#	3	1.3	≤ 26		
		4	2	≤ 40		
		2	0.5	≤ 6		
	22#	3	1	≤ 12	J14T-9ZJ	
		4	1.5	≤ 18		
3	0.5	≤ 10				
2~2.5	22#	2	0.4	≤ 8		
		3	0.8	≤ 16	J14C-9ZJ Y11P-1210ZJ	
		4	1.2	≤ 24		
2.5~3	20#	2	0.4	≤ 13	Y11P-1210ZJ	
		3	0.8	≤ 26	J599/20FC 98PN-H	
		4	1.2	≤ 40		
	24#	2	0.3	≤ 4		
		3	0.7	≤ 8	J14T-9ZJ	
2.5~3	22#	4	1	≤ 12		
		2	0.3	≤ 6		
		3	0.7	≤ 14	J14C-9ZJ Y11P-1208ZJ	
	20#	4	1	≤ 20		
		2	0.3	≤ 10	Y11P-1210ZJ	
3	0.7	≤ 23	J599/20FC 98PN-H			

续表

工作电流 /A	导线规格 (AWG)	供电线路 (N点 N线)	影响因子 / μ	供电距离 /m	单机端电连接器推荐类型	备注
2~2.5	24#	2	0.4	≤ 5		
		3	0.8	≤ 10	J14T-9ZJ	
		4	1.2	≤ 14		
2~2.5	22#	2	0.4	≤ 8		
		3	0.8	≤ 16	J14C-9ZJ Y11P-1210ZJ	
		4	1.2	≤ 24		
	20#	2	0.4	≤ 13	Y11P-1210ZJ	
		3	0.8	≤ 26	J599/20FC 98PN-H	
2.5~3	24#	4	1	≤ 12		
		2	0.3	≤ 6		
		3	0.7	≤ 14	J14C-9ZJ Y11P-1208ZJ	
	20#	4	1	≤ 20		
		2	0.3	≤ 10	Y11P-1210ZJ	
3	0.7	≤ 23	J599/20FC 98PN-H			

3 后续思考及建议

本文通过对目前我国现役火箭中用电设备供电接口的统计分析,针对箭载供电线路进行理论建模,通过对供电接口设计的影响因素进行分析,提出影响因子的概念,得到供电线路的统一化设计选型方法,进一步形成了供电接口的统一化设计要求,并给出箭载电子设备的供电接口统一化建议,为设备供电接口产品化设计提供思路。

在本文的供电接口统一化设计要求论证过程中,结合现役火箭电池供电电压下限以及28V一次用电设备工作电压下限的实际指标情况,取传输允许压降 $\Delta U=1$ 。由影响因子的定义可以看出, μ 值与 ΔU 成正比例关系,即传输允许压降的增加可以使影响因子变大,进而可以在同等设计条件下获得更远的供电距离。可见,从系统总体角度研究箭载电池供电电压以及用电设备工作电压上下限偏差,分析需要开展的工作以及可能的影响,实现指标的优化分配和设计,将大大改善28V直流远距离供电的工况,对后续我国大推力大直径运载火箭的设计具有一定的借鉴意义。

参考文献

- [1] 祝伟, 张金刚, 张佳宁, 等. 基于 1553B 总线的运载火箭供电测控系统设计 [J]. 计算机测量与控制, 2016, 24 (5): 21-24.
- [2] 杨奋为. 航天电连接器的选用 [J]. 上海航天, 2002, 19 (3): 57-62.
- [3] Paul C R. 电磁兼容导论 [M]. 闻映红, 等译. 北京: 机械工业出版社, 2006: 76-80.
- [4] 邱关源. 电路 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2006: 478-480.
- [5] 宋冬, 刘正勇. 电连接器的特性与选用 [J]. 电子机械工程, 2009, 25 (2): 47-49.