

# 典型星载遥感器光学系统总剂量效应 防护方法与设计

张旭辉<sup>1</sup>, 赵学敏<sup>1</sup>, 李兴冀<sup>2</sup>

(1. 北京空间机电研究所 中国空间技术研究院空间光学遥感器技术核心专业实验室, 北京 100094;  
2. 哈尔滨工业大学 材料科学与工程学院, 哈尔滨 150001)

**摘要:** 针对空间不连续工作的典型星载光学遥感器的结构和光学系统, 进行抗辐射薄弱环节与总剂量效应的仿真分析计算, 提出在遥感器入光口遮光罩处增加防护盖以降低光学系统中辐射吸收剂量预示最大位置处的吸收剂量, 并对防护盖的具体参数进行仿真优化设计。研究表明: 光学系统各光学部件所在位置辐射吸收剂量处于不均匀状态, 接收地物信息的第一镜体处的预示值最大; 安装防护盖后, 可大幅降低该处的辐射吸收剂量, 使之与其他部位的吸收剂量处于同一量级水平; 防护盖的实施参数以厚度 1~3 mm、距离入光口遮光罩端部小于 20 mm 为最佳。文章最后描述了防护盖设计方法的通用性, 给出了防护盖的适用技术条件。

**关键词:** 星载光学遥感器; 光学系统; 总剂量效应; 辐射防护; 优化设计

中图分类号: P111.3; TL7

文献标志码: B

文章编号: 1673-1379(2018)04-0371-06

DOI: 10.3969/j.issn.1673-1379.2018.04.011

## Protection method for total dose effect on the optical system of typical satellite remote sensor and related design

ZHANG Xuhui<sup>1</sup>, ZHAO Xuemin<sup>1</sup>, LI Xingji<sup>2</sup>

(1. Key Laboratory for Optical Remote Sensor Technology of CAST, Beijing Institute of Space Mechanics & Electricity, Beijing 100094, China; 2. School of Materials Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

**Abstract:** In view of the structure and the optical system of the typical satellite remote sensor working intermittently in space, the paper analyzes the weak link of the optical system with regard to the radiation protection. Based on the simulation analysis of the total dose on the optical system, an approach of adding a protective cover at the baffle's entrance is proposed to reduce the absorbed radiation dose where the largest dose is predicted, and the design of the protective cover is optimized through the simulation. It is shown that the radiation dose on the optical element is in a non-uniform distribution at different positions of the remote sensor, and the radiation dose on the first mirror used for receiving the object information is the largest. After installing the protective cover, the absorbed dose is decreased remarkably to a similar order of magnitude as that on the other parts. The protective cover has the best effect when it is 1 to 3 mm in thickness, and less than 20 mm away from the baffle's entrance. This method of the radiation protection can be widely applied with practical technical specifications.

**Key words:** satellite remote sensor; optical system; radiation effects; protection method; optimization design

收稿日期: 2018-03-14; 修回日期: 2018-05-24

基金项目: 装备预研抗辐射加固项目 (编号: 51311XXXXXX)

**引用格式:** 张旭辉, 赵学敏, 李兴冀. 典型星载遥感器光学系统总剂量效应防护方法与设计[J]. 航天器环境工程, 2018, 35(4): 371-376

ZHANG X H, ZHAO X M, LI X J. Protection method for total dose effect on the optical system of typical satellite remote sensor and related design[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2018, 35(4): 371-376

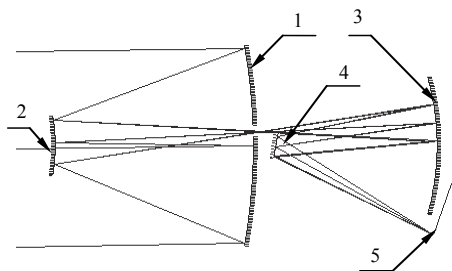
## 0 引言

光学系统是星载光学遥感器的核心部分之一,由多种、多个光学元件组成,包括反射元件、透射元件及光学滤光元件等。不同种类的光学元件所表征的物理参量不同,所受空间辐射损伤影响也不尽相同,其空间辐射效应主要表现为光学元/部件的辐射损伤、着色与放电损伤、光学涂层的辐射退化、光学表面的辐射污染等<sup>[1-6]</sup>。对星载光学遥感器而言,辐射对光学系统产生的总剂量效应将导致遥感器光谱漂移、离焦、分辨率下降等,从而使遥感器性能衰减甚至功能丧失。因此,在进行光学遥感器总体或光学系统设计时,必须依据轨道参数、辐射环境等技术参数考虑空间环境所引起的辐射效应,开展光学系统辐射防护设计。

本文给出了降低遥感器光学系统辐射环境恶劣部位辐射总剂量的针对性局部防护方法和设计过程,以及优化后的工程实施参数和防护效果。

## 1 遥感器光学系统模型

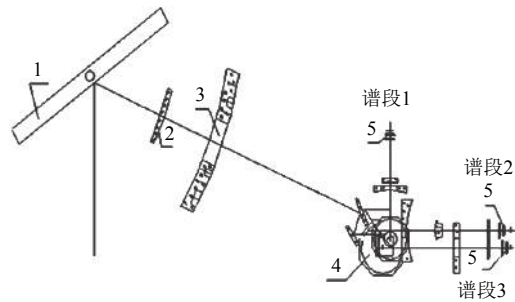
遥感器光学系统一般主要由望远光学、中继光学及光学窗口等部分组成,其在探测光谱范围、探测光谱谱段多少、探测光谱细分程度高低等方面存在一定差异。图1为典型的单谱段遥感器光学系统原理图,主要由主镜、次镜、校正镜、折转镜及滤光镜等组成。图2为典型的多谱段遥感器光学系统原理图,主要由扫描镜、主镜、次镜、中继光学及滤光镜等组成。一般而言,光学系统中各光学部件在遥感器中沿光路走向分布于遥感器主体入光口、遥感器主体中部及遥感器主体焦平面附近。



1. 第一镜(主镜); 2. 第二镜(次镜); 3. 第三镜(校正镜);  
4. 折转镜; 5. 滤光镜(焦平面)。

图1 单谱段遥感器光学系统原理示意图

Fig. 1 The principle of optical system on the panchromatic single spectral remote sensor



1. 扫描镜; 2. 次镜; 3. 主镜; 4. 中继光学; 5. 滤光镜。

图2 多谱段遥感器光学系统原理示意图

Fig. 2 The principle of optical system on the multispectral remote sensor

## 2 遥感器光学系统抗辐射能力总体分析

遥感器光学系统是否满足在轨抗总剂量辐射要求取决于2方面:一是其周围的辐射环境严酷程度;二是其本身固有的抗辐射特性优劣。对于一个特定的光学系统,其抗总剂量辐射的能力主要依赖于光学系统各部件在遥感器中的位置及其周围的空间屏蔽情况。

光学遥感器光学系统中除对外观测窗口镜体直接暴露外,其他各光学部件周围均有遥感器结构屏蔽层保护;相较于其他部位光学部件,对外观测窗口镜体所处的辐射环境最为恶劣,其抗辐射能力也相对薄弱。

图3和图4分别为典型的单谱段和多谱段遥感器光学系统的主体结构模型。分析遥感器的结构屏蔽特点和光学系统布局可以看出,图3中的主镜、次镜和图4中的扫描镜处于遥感器光学系统中辐射环境最为恶劣的位置。通过对结构模型的辐射屏蔽和辐射剂量的三维分析计算,光学系统各部位的总剂量分布结果也验证了这一分析结论。



图3 单谱段光学遥感器结构模型

Fig. 3 The structure model of the single spectral remote sensor

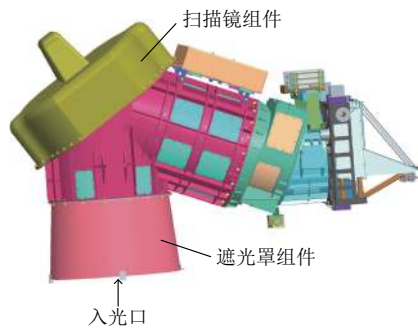


图4 多谱段光学遥感器结构模型

Fig. 4 The structure model of the multispectral remote sensor

利用中国空间技术研究院“航天器空间环境与效应分析(SEES)”软件,对图3所示的结构模型进行了辐射总剂量三维分析计算。表1给出了其光学系统中各镜体处太阳同步轨道5年寿命期辐射总剂量预示值。计算结果显示,遥感器中主镜(第一接收地物信息的镜体,即第一镜)处的总剂量预示值最大,所处辐射环境最为恶劣。

表1 遥感器中光学系统各部位辐射总剂量计算结果

Table 1 The calculated data of the total radiation dose on the optical system parts of the remote sensor

屏蔽厚度/ mm(Al)	辐射总剂量定量计算数据/rad(Si)				
	次镜	主镜	折转镜	第三镜	滤光镜
0.0	4.69E+04	1.77E+05	4.51E+03	5.32E+03	5.37E+03
0.5	2.51E+04	9.47E+04	4.38E+03	4.99E+03	5.12E+03
1.0	1.60E+04	4.58E+04	4.26E+03	4.75E+03	4.93E+03
1.5	1.05E+04	2.71E+04	4.16E+03	4.52E+03	4.77E+03
2.0	8.15E+03	1.58E+04	4.08E+03	4.33E+03	4.63E+03
2.5	6.64E+03	1.12E+04	3.99E+03	4.18E+03	4.51E+03
3.0	5.89E+03	8.40E+03	3.91E+03	4.06E+03	4.41E+03
3.5	5.38E+03	7.10E+03	3.84E+03	3.95E+03	4.31E+03
4.0	5.06E+03	6.22E+03	3.77E+03	3.84E+03	4.22E+03
4.5	4.77E+03	5.74E+03	3.71E+03	3.75E+03	4.14E+03
5.0	4.51E+03	5.37E+03	3.64E+03	3.66E+03	4.06E+03

从表1数据可以看出,该模型中光学系统各光学部件所在位置辐射剂量处于不均匀状态,在当前结构形式(即无屏蔽)下,其主镜处的辐射剂量预示值约为其他部位(次镜、滤光镜、第三镜、折转镜)的4~40倍。

同理,对于图4所示的遥感器结构模型,其扫描镜(第一接收地物信息镜体)处的辐射剂量预示值最大,亦为其他部位(主镜、次镜、中继光学、滤光镜)的数倍。

可见,对于一个特定的光学系统,通过采取防护措施降低辐射剂量预示值最大处的辐射剂量,即可大大提高遥感器光学系统的综合抗辐射能力。

### 3 光学系统抗辐射局部防护方案分析

从遥感器系统分析模型辐射剂量分布计算结果(表1)看,在当前结构形式(即无Al屏蔽)下,如进一步对图1中各镜体增加屏蔽厚度,与相机暴露窗口对应的主镜处的辐射剂量改善最为显著。这说明,总剂量预示值最大的部位相较光学系统其他部位而言,其剂量值的贡献差异主要来源于遥感器暴露窗口(对地观测窗口)。

一般而言,结构屏蔽是降低总剂量效应影响的最有效手段。采用屏蔽方法,以降低实际辐射剂量为目的,有2种可行的辐射防护方案:一是对结构模型进行整体优化设计;二是在镜头前方对镜头进行屏蔽保护。对于具有一定结构模式的遥感器来讲,第2种方案无疑是降低遥感器中最恶劣辐射环境部位辐射剂量最为简便有效的手段。

在轨非连续工作的光学遥感器,如处于太阳同步轨道的光学遥感器,通常采用间断工作模式,关机时间远远大于工作时间(一般情况下,工作时间约是关机时间的1/4~1/10)。这种工作模式为在镜头前方(遮光罩端口)对镜头实施屏蔽保护提供了可行的必要条件。采取加装防护盖方案,则光学遥感器的在轨工作模式为:开机时间镜头防护盖打开;关机时间镜头防护盖关闭。

防护盖防护方案实施后,可使遥感器在轨期间的大部分时间处于屏蔽封闭保护状态,大大减少镜头的直接暴露时间,也因屏蔽作用使原裸露镜体处的辐射环境得到极大改善,从而减弱空间辐射环境对原裸露镜体的辐射效应影响。

### 4 光学系统抗辐射局部防护设计

#### 4.1 设计原则

光学系统抗辐射局部防护设计采用防护盖方案时,主要遵循2个原则:一是能有效降低辐射环境最恶劣部位的辐射剂量;二是满足工程实际实施应用。工程实现方面应考虑原材料的选择、最小重量原则及安装可行性、可靠性等。

以上几方面经常是相互联系、不可分割的。

#### 4.2 设计过程

为了实现辐射防护的工程化应用,进行防护盖

设计应以一定的光学遥感器结构模型为基础,降低辐射环境最恶劣部位辐射剂量是否有效也必须以遥感器辐射剂量分布计算结果为依据进行评估。

以下根据图3全色单谱段光学遥感器结构模型,利用莫斯科大学COSMIC软件,对防护盖方案进行剂量分析与具体设计,对防护盖在遥感器中的位置和厚度进行优化。防护盖采用航天器非主承力件常用的铝合金材料,图5给出了其安装位置示意。

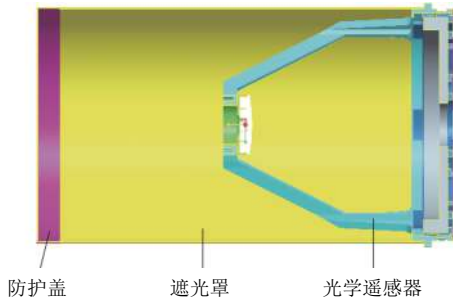


图5 防护盖的安装位置示意  
Fig. 5 The installed position of the shield

图6给出了以地球辐射带为环境输入条件(太阳同步轨道10年寿命期辐射剂量)的防护盖的设计计算过程示意。

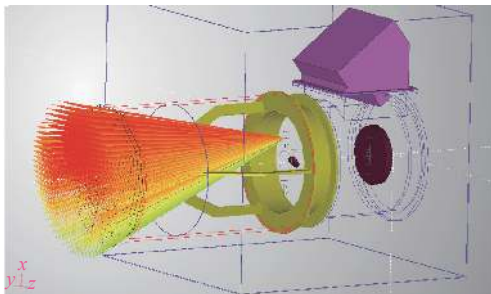
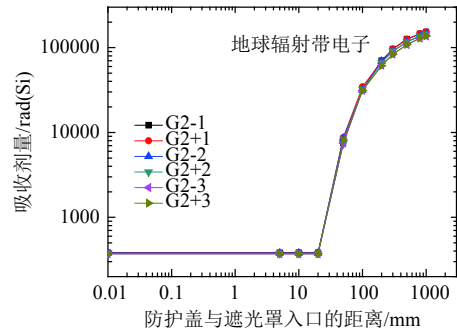


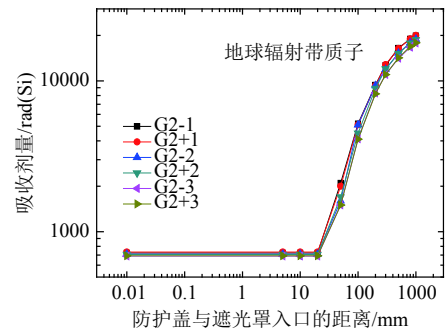
图6 防护盖的设计计算分析过程示意  
Fig. 6 The design process of the shield

图7和图8分别给出了防护盖安装位置和防护盖厚度对防护效果的影响。图中的G2+1、G2-1、G2+2、G2-2、G2+3、G2-3为图1(图3)中主镜(环境最恶劣处)上不同取样位置点(见图6中圆锥顶点所指位置)的吸收剂量,其中“+”“-”号表示主镜径向圆周方向的位置点为对称关系。

从图7可以看出:当Al防护盖与镜头间的距离小于20mm时,对地球辐射带电子、质子的防护效果最佳;当Al防护盖与镜头间的距离大于20mm时,对地球辐射带电子、质子的吸收剂量急剧增加,防护效果出现拐点,呈明显减弱趋势。

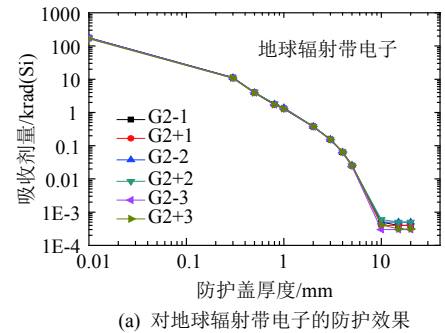


(a) 对地球辐射带电子的防护效果

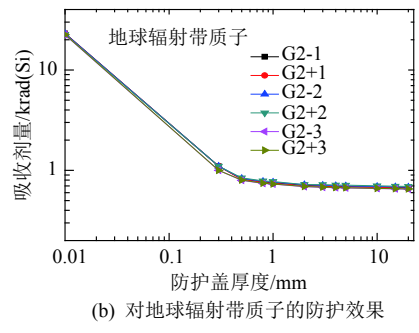


(b) 对地球辐射带质子的防护效果

图7 防护盖安装位置对防护效果的影响  
Fig. 7 The partial protected design result of the shield



(a) 对地球辐射带电子的防护效果



(b) 对地球辐射带质子的防护效果

图8 防护盖厚度对防护效果的影响  
Fig. 8 The partial protected design result of the shield

从图8可以看出:地球辐射带电子、质子在图1主镜处的吸收剂量随Al防护盖厚度(遮光罩处)的增加逐渐减弱;当防护盖厚度达到1mm时,起主要辐射作用的地球辐射带电子的吸收剂量下降



到与辐射带质子的吸收剂量相同的数量级，约为 1 krad(Si)。具体分析计算结果见表 2，表中还包括运用软件定量计算出的其他辐射环境，如银河宇宙射线、太阳宇宙射线等，在防护前/后的吸收剂量数据。

图 9 为遮光罩上的防护层厚度(防护盖本身的厚度)和位置(防护盖与遮光罩入口的距离)示意。

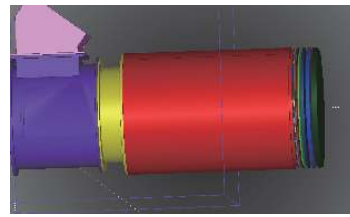


图 9 遮光罩上的防护盖厚度和位置示意

Fig. 9 The shield thickness and position with respect to the baffle

表 2 镜头防护盖辐射防护分析计算结果

Table 2 Analysis and calculation results of protection effect of the Al shield

防护盖厚度/ mm(Al)	辐射源	各位置点吸收剂量/krad(Si)					
		G2-1	G2+1	G2-2	G2+2	G2-3	G2+3
0	地球电子	178.0	176.7	177.3	173.9	172.8	173.4
	地球质子	23.1	23.0	23.0	22.6	22.4	22.5
	太阳质子	15.8	15.5	15.9	15.8	15.4	15.5
	银河质子	0.048	0.048	0.048	0.047	0.046	0.046
0.3	地球电子	11.2	11.2	11.2	11.0	10.8	10.9
	地球质子	1.1	1.1	1.1	1.1	1.0	1.0
	太阳质子	0.790	0.788	0.782	0.767	0.752	0.760
	银河质子	0.031	0.031	0.030	0.030	0.029	0.029
0.5	地球电子	4.0	4.0	4.0	4.1	3.9	3.9
	地球质子	0.821	0.814	0.833	0.843	0.796	0.800
	太阳质子	0.370	0.362	0.375	0.375	0.352	0.357
	银河质子	0.023	0.022	0.023	0.023	0.022	0.022
0.8	地球电子	1.8	1.7	1.8	1.8	1.7	1.7
	地球质子	0.764	0.760	0.777	0.787	0.742	0.745
	太阳质子	0.256	0.251	0.260	0.261	0.242	0.246
	银河质子	0.018	0.018	0.019	0.019	0.018	0.018
1.0	地球电子	1.3	1.3	1.4	1.3	1.3	1.3
	地球质子	0.752	0.746	0.763	0.774	0.729	0.732
	太阳质子	0.231	0.226	0.235	0.237	0.218	0.221
	银河质子	0.017	0.017	0.018	0.018	0.017	0.017
2.0	地球电子	0.380	0.372	0.382	0.380	0.370	0.372
	地球质子	0.710	0.705	0.722	0.732	0.688	0.691
	太阳质子	0.162	0.159	0.166	0.168	0.150	0.154
	银河质子	0.014	0.014	0.014	0.015	0.014	0.014
3.0	地球电子	0.155	0.152	0.156	0.155	0.150	0.152
	地球质子	0.699	0.694	0.710	0.721	0.677	0.681
	太阳质子	0.142	0.140	0.146	0.148	0.131	0.134
	银河质子	0.013	0.013	0.014	0.014	0.013	0.013
4.0	地球电子	0.064	0.063	0.065	0.064	0.062	0.063
	地球质子	0.693	0.689	0.705	0.716	0.672	0.675
	太阳质子	0.132	0.130	0.136	0.138	0.121	0.124
	银河质子	0.013	0.013	0.013	0.013	0.012	0.012

### 4.3 设计结果

根据辐射防护软件计算结果，针对具体光学系统结构模型(图 3)，在其镜头前方增加防护盖，防护盖的形式简单(可平板、可凹形)且具有与模型中镜头前方遮光筒组件一致的工程安装特性。考虑星上质量最小化原则，防护盖的厚度范围为 1~3 mm，

防护盖在镜头(遮光罩)前方的位置在 20 mm 内防护达到最佳效果。

从软件计算的定量数据(表 2)来看，经防护盖 1~3 mm 的屏蔽防护后，地球辐射带通过暴露窗口贡献给最恶劣环境部位(主镜处)的辐射剂量从 201.1 krad(Si) 下降到 2.05~0.85 krad(Si) 范围内，

大约是原辐射剂量的 1/100, 即下降了 2 个数量级。若考虑遥感器在轨开机/关机时间比, 主镜处辐射剂量可下降至不加防护时的数分之一, 如遥感器在轨开机/关机时间比为 1/4, 则主镜处的辐射吸收剂量可从 201.1 krad(Si) 下降至 51.81~50.91 krad(Si) 范围内, 约降至不加防护盖时的 1/4。

从表 2 中也可以看出, 对于极高能量的银河宇宙射线粒子, 防护前/后剂量变化不明显, 但因其剂量极小, 一般可忽略不计。

综上所述, 防护盖防护方案可大幅降低遥感器最恶劣环境部位的辐射吸收剂量, 使其处的辐射吸收剂量与光学系统中其他部位的吸收剂量处于同一量级水平。

## 5 结束语

对于主要受总剂量辐射效应影响的星载光学遥感器而言, 结合本文仿真分析设计结果以及国内外卫星的工程应用, 在镜头前方加装适当的防护盖可以收获良好的辐射防护和热防护双重效果。基于光学遥感器对地观测窗口的共性, 防护盖防护方案具有通用性, 适用于所有在轨不连续工作光学遥感器(如服役于太阳同步轨道的长寿命光学遥感器、地球同步轨道定时工作的长寿命光学遥感器等)光学系统的辐射防护, 且是针对光学遥感器光学系统抗辐射最薄弱环节或辐射环境最恶劣部位(直接暴露窗口导致)最有效、最直接的防护方法。实际工程

应用中, 是否实施防护盖进行辐射防护, 还需要结合相机光学系统抗总剂量能力评估结果及光学遥感器其他功能需求进行决策, 如考虑镜头处于不能承受其所要求的空间辐射剂量、光学遥感器需要规避日凌等热防护需求等情形, 可单纯因辐射防护需求使用, 也可与其他需求因素共同考虑使用。

### 参考文献 (References)

- [1] 杜继实, 吴洁华, 赵丽丽, 等. 玻璃空间电离辐照着色研究[J]. 无机材料学报, 2012, 27(4): 411-416  
DU J S, WU J H, ZHAO L L, et al. Coloration of glasses induced by space ionizing radiation[J]. Journal of Inorganic Materials, 2012, 27(4): 411-416
- [2] 丁富荣, 班勇, 夏宗璜. 辐射物理[M]. 北京: 北京大学出版社, 2004: 5-22
- [3] 沈自才, 丁义刚. 抗辐射设计与辐射效应[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2015: 243-250
- [4] 沈自才. 空间辐射环境工程[M]. 北京: 中国宇航出版社, 2013: 1-3
- [5] 刘海, 何世禹, 王怀义. 质子和电子对光学反射镜辐射效应的研究[J]. 航天返回与遥感, 2002, 23(1): 13-17  
LIU H, HE S Y, WANG H Y. Effect of proton and electron on the surface of optical mirrors[J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing, 2002, 23(1): 13-17
- [6] DOYLE D B, BOURRIEAU J, BRICARD P M, et al. Effect of electron irradiation on the radius of curvature of a Zerodur mirror[J]. Optical Instrumentation & Systems design: Proc SPIE, 1996(2775): 166-188

(编辑: 张艳艳)