



天津市地方计量技术规范

JJF (津) 72—2022

辐射测温用 $-50^{\circ}\text{C}\sim 1400^{\circ}\text{C}$ 黑体辐射源 校准规范

Calibration Specification for Blackbody Radiation
Sources of Radiation Thermometry from -50°C to 1400°C

2022-07-25 发布

2022-10-25 实施

天津市市场监督管理委员会 发布

辐射测温用 $-50^{\circ}\text{C}\sim 1400^{\circ}\text{C}$
黑体辐射源校准规范

JJF (津) 72—2022

Calibration Specification for Blackbody

Radiation Sources of Radiation Thermometry

from -50°C to 1400°C

归口单位：天津市市场监督管理委员会

主要起草单位：天津市计量监督检测科学研究院

本规范委托天津市计量监督检测科学研究院负责解释

本规范主要起草人：

余松林（天津市计量监督检测科学研究院）

王 喆（天津市计量监督检测科学研究院）

蒋 静（天津市计量监督检测科学研究院）

参加起草人：

杨 佳（天津市计量监督检测科学研究院）

王晓丹（天津市计量监督检测科学研究院）

目 录

引言	II
1 范围	1
2 引用文件	1
3 术语	1
4 概述	1
4.1 原理与结构	1
4.2 黑体辐射源的特性参数	2
5 计量特性	2
5.1 温度稳定性	2
5.2 亮度温度	2
5.3 温度均匀性	2
5.4 绝缘电阻	2
6 校准条件	2
6.1 环境条件	2
6.2 标准器及配套设备	2
7 校准项目和校准方法	3
7.1 校准项目	3
7.2 校准方法	3
8 校准结果的表达	6
9 复校间隔时间	6
附录 A 校准报告内页参考格式	7
附录 B 黑体辐射源发射率偏离 1 引起的亮度温度校准误差	8
附录 C 黑体辐射源亮度温度校准不确定度评定示例	9

引言

本规范依据 JJF 1071-2010《国家计量校准规范编写规则》和 JJF 1001-2011《通用计量术语及定义》的要求编写，并依据 JJF 1059.1-2012《测量不确定度评定与表示》给出了亮度温度校准结果的不确定度评定示例。计量特性等主要参考了 JJG 856-2015《工作用辐射温度计》和 JJF 1552-2015《辐射测温用-10℃~200℃黑体辐射源校准规范》。

本规范为首次发布。

辐射测温用 $-50^{\circ}\text{C}\sim 1400^{\circ}\text{C}$ 黑体辐射源校准规范

1 范围

本规范适用于辐射测温用腔式黑体辐射源在 $(-50\sim -10)^{\circ}\text{C}$ 和 $(200\sim 1400)^{\circ}\text{C}$ ，以及面辐射源在 $(-15\sim 500)^{\circ}\text{C}$ 范围段校准。

2 引用文件

本规范引用下列文件：

JJG 856 《工作用辐射温度计》

JJF 1552 《辐射测温用 $-10^{\circ}\text{C}\sim 200^{\circ}\text{C}$ 黑体辐射源校准规范》

凡是注日期的引用文件，仅注日期的版本适用于本规范；凡是不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本规范。

3 术语

JJF 1552-2015 中界定的及以下术语和定义适用于本规范。

3.1 [绝对] 黑体 [absolute] blackbody [3.1, JJF 1552]

对任意方向、波长和偏振态的入射辐射都能够全部吸收的理想热辐射体。

3.2 [空腔] 黑体辐射源 [cavity] blackbody radiation source [3.2, JJF 1552]

用于检定或校准辐射温度计、具有稳定控制的温度和明确的发射率且热辐射特性接近于黑体的凹形装置。

3.3 [法向光谱] 发射率 [normal spectral] emissivity [3.3, JJF 1552]

物体的法向光谱辐射亮度与同温度黑体光谱辐射亮度之比。

3.4 [有效] 发射率 [effective] emissivity [3.4, JJF 1552]

黑体辐射源有效光谱辐射亮度与同温度黑体辐射亮度之比。

3.5 [有效] 亮度温度 [effective] radiance temperature [3.5, JJF 1552]

给定波长范围内辐射亮度与被测热辐射体有效辐射亮度相等的黑体的温度。

4 概述

4.1 原理与结构

黑体辐射源是温度已知并可稳定工作的热辐射源，通常由黑体空腔或辐射面板、温度测量与控制系统等构成，按照结构可分为腔式辐射源和面辐射源。黑体辐射源主要用于辐射温度计和热像仪等辐射测温仪器的校准。

4.2 黑体辐射源的特性参数

黑体辐射源特性参数包括开口直径、有效发射率、亮度温度、温度均匀性和温度稳定性等。

5 计量特性

5.1 温度稳定性

温度稳定性为 10 min 时间间隔内黑体辐射源有效靶面区域内亮度温度变化的最大值。

5.2 亮度温度

黑体辐射源亮度温度的不确定度应满足所开展的辐射温度计或热像仪等辐射测温仪器校准的不确定度要求。

5.3 温度均匀性

温度均匀性为黑体辐射源有效靶面区域内各测量点与中心点的温差。

5.4 绝缘电阻

常温下，黑体辐射源的绝缘电阻不小于 0.5 MΩ。

黑体辐射源的计量特性要求见表 1。

表 1 黑体辐射源计量特性要求

类别	温度范围 (°C)	稳定性 1/10 min	均匀性	发射率
腔式辐射源	-50~-10 或 200~1400	不大于 (0.1°C 与 0.1% t 的大者)	不大于 (0.15°C 与 0.15% t 的大者)	1±0.002 或 1±0.005 或 1±0.01
面辐射源	-15~500	不大于 (0.15°C 与 0.15% t 的大者)	不大于 (0.2°C 与 0.2% t 的大者)	≥0.95

注：以上指标不是用于合格性判别，仅供参考。

6 校准条件

6.1 环境条件

环境温度：(18~28) °C；相对湿度：(20~85) %。

满足标准及辅助设备、被校准设备的使用环境条件要求。应无影响校准结果的环境辐射和空气对流。

6.2 标准器及配套设备

标准器及配套设备的性能技术指标见表 2。

表 2 标准器及配套设备的性能指标

序号	设备名称	技术性能指标	备注
1	精密辐射温度计	测量温度范围满足校准温度范围要求	用于辐射源有效亮度温度、温度均匀性和温度稳定性测量
		工作波段为 (8~14) μm 或其他波段	
		噪声等效温差应不劣于校准结果最小量化值	
		视场不超过黑体辐射源腔口直径的 1/2	
		测量分辨力通常不大于 0.05 $^{\circ}\text{C}$	
	最大允差不大于 $\pm(1\%t)^{\circ}\text{C}$ 或 $\pm 1.4^{\circ}\text{C}$ 的大者		
2	标准铂电阻温度计及配套电测设备	二等, 测量范围覆盖 (-50~-10) $^{\circ}\text{C}$; 电测设备的准确度等级不低于 0.02 级, 分辨力不低于 1 $\text{m}\Omega$	用于腔式辐射源在 (-50~-10) $^{\circ}\text{C}$ 范围的温度稳定性测量
3	精密移动台或支架	移动量程满足需求; 移动重复性不低于 1 mm	用于精密辐射温度计位置固定和调整
4	绝缘电阻表	额定电压 500V, 10 级	用于黑体辐射源绝缘电阻测量

7 校准项目和校准方法

7.1 校准项目

校准项目如表 2。

表 2 黑体辐射源校准项目

序号	项目名称
1	绝缘电阻
2	温度稳定性
3	亮度温度
4	温度均匀性

注: 亮度温度项目校准结果中应注明精密辐射温度计发射率和工作波段, 一般精密辐射温度计的发射率设置为 1。

7.2 校准方法

7.2.1 绝缘电阻测试

在不连接电源的情况下, 将黑体辐射源电源开关打开。对使用接触器 (需接通外部电源后才能接通的开关) 的黑体辐射源, 如可能, 应设法使接触器处于接通状态。

使用绝缘电阻测试仪在 500V 测试电压下, 分别测量黑体辐射源电源输入端的相线 L 与地线 G、中线 N 与地线 G、相线 L 与仪器外壳的绝缘电阻。

取所有测量值中最小值作为绝缘电阻的测量结果。

7.2.2 温度稳定性测试

7.2.2.1 测试方法

- 1). 被校设备、标准器及电测仪表开机预热。
- 2). 选择校准温度点，在黑体辐射源温度范围内均匀分布，优先选择整10℃点，也可根据用户要求选择。
- 3). 校准温度点在-10℃~1400℃范围时，采用精密辐射温度计为标准器。调整精密移动台或支架，使精密辐射温度计与黑体辐射源同轴。此时辐射温度计瞄准黑体辐射源的靶口中心位置。
- 4). 校准温度点在-50℃~-10℃范围时，采用标准铂电阻温度计为标准器。将标准铂电阻插入被校黑体辐射源测量位置。
- 5). 被校腔式（面）辐射源温度设定在校准温度点，10 min 温度控制稳定性不大于0.1℃（0.15℃）或0.1% t （0.15% t ）中的大者（ t 为校准温度点的绝对值，单位为℃）时，开始读数，时间间隔为1 min。
- 6). 记录精密辐射温度计或标准铂电阻配套电测仪表 n 次测量值。（ n 通常为11）

7.2.2.2 数据处理

被校黑体辐射源的温度稳定性由公式（1）计算：

$$\Delta T_{cr} = T_{cr\ max} - T_{cr\ min} \quad (1)$$

式（1）中：

ΔT_{cr} ——被校黑体辐射源的温度稳定性，℃；

$T_{cr\ max}$ ——测量的被校黑体辐射源的示值最大值，℃；

$T_{cr\ min}$ ——测量的被校黑体辐射源的示值最小值，℃。

7.2.3 亮度温度校准

7.2.3.1 测试方法

- 1) 选择校准温度点，在黑体辐射源温度范围内均匀分布，优先选择整10℃点，也可根据用户要求选择。
- 2) 调整精密移动台或支架，使精密辐射温度计与黑体辐射源同轴。此时辐射温度计瞄准黑体辐射源的靶口中心位置。

- 3) 被校腔式 (面) 辐射源温度设定在校准温度点, 10 min 温度控制稳定性不大于 0.1°C (0.15°C) 或 $0.1\%t$ ($0.15\%t$) 中的大者 (t 为校准温度点的绝对值, 单位为 $^{\circ}\text{C}$) 时, 按照精密辐射温度计 → 辐射源温控表 → 精密辐射温度计 → 辐射源温控表……的顺序, 重复循环读数 4 次。

7.2.3.2 数据处理

被校黑体辐射源的亮度温度, 根据公式 (3) 下式计算:

$$T_c = \bar{T}_{cr} + \Delta T_F + \Delta T_{\varepsilon} \quad (3)$$

T_c ——被校黑体辐射源的亮度温度, $^{\circ}\text{C}$ 。

\bar{T}_{cr} ——精密辐射温度计测量的被校黑体辐射源亮度温度示值的平均值, $^{\circ}\text{C}$ 。

ΔT_F ——精密辐射温度计在校准温度点的亮度温度修正值, $^{\circ}\text{C}$ 。

ΔT_{ε} ——黑体辐射源发射率不为 1 引入的亮度温度修正值。

7.2.4 温度均匀性测试

7.2.4.1 测试方法

- 1) 选择温度点, 在黑体辐射源温度范围内均匀分布, 优先选择整 10°C 点, 也可根据用户要求选择。
- 2) 均匀性测试位置选择黑体辐射源的中部、上部、右部、下部和左部五个点。
- 3) 被校黑体辐射温度设定点在测试温度点, 温度稳定后开始读数。
- 4) 调整精密移动台或支架, 使精密辐射温度计与黑体辐射源同轴。
- 5) 如图 1 所示, 按照中 (O) → 上 (A), 中 (O) → 右 (B), 中 (O) → 下 (C), 中 (O) → 左 (D) 的顺序测量。周围测量点与中心点的距离为辐射源开口半径的约 $2/3$ 。
- 6) 每个位置上共进行 n 次测量 (这里 n 通常为 3)。

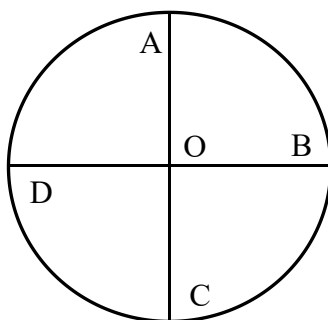


图 1 温度均匀性测量位置示意图

7.2.4.2 数据处理

温度均匀性为各测量点温度与中心温度之差，根据公式（2）计算：

$$\Delta T_u = \bar{T}_u - \bar{T}_{ou} \quad (2)$$

ΔT_u ——各点温度与中心温度之差，℃。

\bar{T}_u ——被校黑体辐射源有效靶面区域上部、右部、下部和左部的亮度温度测量平均值，℃。

\bar{T}_{ou} ——被校黑体辐射源有效靶面区域中心位置亮度温度的平均值，℃。

8 校准结果的表达

经校准的黑体辐射源出具校准证书，校准证书至少应包括以下信息：

- a) 标题“校准证书”；
- b) 实验室名称和地址；
- c) 进行校准的地点（如果与实验室的地址不同）；
- d) 证书的唯一性标识（如编号），每页及总页数的标识；
- e) 客户的名称和地址；
- f) 被校对象的描述和明确标识；
- g) 进行校准的日期；
- h) 校准所依据的技术规范的标识，包括名称及代号；
- i) 本次校准所用测量标准的溯源性及有效性说明；
- j) 校准环境的描述；
- k) 校准结果应包括绝缘电阻的测试结果、温度稳定性、温度均匀性和亮度温度及其测量不确定度的说明；其中稳定性测量结果应给出测试的时间，均匀性测量结果应给出测量点位置分布的定量说明及示意图；亮度温度校准结果处，应给出精密辐射温度计的发射率和测量波段。
- l) 对校准规范的偏离的说明；
- m) 校准证书或校准报告签发人的签名、职务或等效标识；
- n) 校准人和核验人签名；
- o) 校准结果仅对被校对象有效性的声明；
- p) 未经实验室书面批准，不得部分复制校准证书的声明。

9 复校时间间隔

建议复校时间间隔为 1 年，或送校单位根据需求自定复校周期。

附录 A

校准报告内页参考格式

一、绝缘电阻测试结果

测试电压/V	绝缘电阻/M Ω

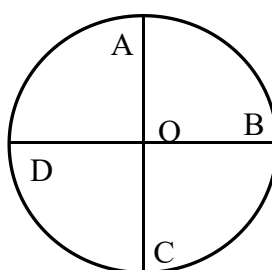
二、温度稳定性测试结果

校准温度点/°C	温控表显示值/°C	温度稳定性/°C

三、亮度温度校准结果

校准温度点	温控表显示值	亮度温度	扩展不确定度 U ($k=2$)

四、温度均匀性测试结果



温度均匀性测量位置示意图

校准温度点 /°C	温控表显示值 /°C	与中心 O 点差值/°C			
		A	B	C	D

附录 B

黑体辐射源发射率偏离 1 引起的亮度温度校准误差

本附录给出了采用精密辐射温度计校准黑体辐射源准亮度温度时受黑体辐射源发射率偏离 1 的影响引起的亮度温度校准修正值 ΔT_ε 的计算方法。

B.1 ΔT_ε 的计算

常见的精密辐射温度计工作波长为 0.65 μm 、0.9 μm 、1.57 μm 和 (8~14) μm 等。表 B.1 给出了环境温度为 20 $^\circ\text{C}$ 时，黑体辐射源发射率为 0.99 时，不同精密辐射温度计测量的黑体辐射源亮度温度与实际亮度温度的差异。其他数值发射率 ε 下的 ΔT_ε 可根据表 B.1 中的数据采用内插方法按公式 (B.1) 计算得到。

$$\Delta T_\varepsilon \approx 100 \times (1 - \varepsilon) \times \Delta T_{0.99} \quad (\text{B.1})$$

表 B.1 在环境温度为 20 $^\circ\text{C}$ 时 0.99 发射率引起的亮度温度修正值 $\Delta T_{0.99}$

$\lambda/\mu\text{m}$ $t/^\circ\text{C}$	0.65	0.9	1.6	2.2	4	10	8~14	7~18	Total
-50						-1.26	-1.20	-1.15	-1.10
-20					-1.03	-0.52	-0.51	-0.51	-0.50
0					-0.30	-0.22	-0.22	-0.22	-0.22
20					0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
50					0.20	0.26	0.27	0.27	0.26
100				0.21	0.36	0.62	0.63	0.62	0.58
200			0.25	0.34	0.62	1.26	1.27	1.25	1.01
300			0.37	0.50	0.91	1.92	1.92	1.87	1.34
400		0.28	0.51	0.70	1.26	2.63	2.61	2.54	1.63
500		0.38	0.67	0.92	1.65	3.37	3.35	3.25	1.90
600		0.48	0.85	1.17	2.09	4.15	4.12	3.99	2.16
800	0.52	0.72	1.29	1.76	3.10	5.79	5.74	5.56	2.68
1000	0.74	1.02	1.81	2.47	4.25	7.51	7.44	7.23	3.19
1200	0.98	1.36	2.42	3.29	5.25	9.29	9.21	8.96	3.69
1500	1.43	1.97	3.49	4.70	7.60	12.04	11.94	11.65	4.45
2000	2.34	3.24	5.65	7.47	11.42				5.70
2500	3.49	4.81							
3000	4.85	6.67							

注：Total 表示引起的全波长亮度温度误差。

B.2 ΔT_ε 引入的不确定度计算

被校黑体辐射源发射率 ε 的不确定度 $u(\varepsilon)$ 引入的 ΔT_ε 的不确定度 $u(\Delta T_\varepsilon)$ ，可由公式 (B.2) 或 (B.3) 计算：

$$u(\Delta T_\varepsilon) \approx \frac{u(\varepsilon)}{1-\varepsilon} \times |\Delta T_\varepsilon| \quad (\text{B.2})$$

$$u(\Delta T_\varepsilon) \approx 100 \times u(\varepsilon) \times |\Delta T_{0.99}| \quad (\text{B.3})$$

附录 C

黑体辐射源亮度温度校准不确定度评定示例

C.1 亮度温度校准不确定度评定

C.1.1 测量方法

选择校准温度点，在黑体辐射源温度范围内均匀分布，优先选择整 10℃ 点，也可根据用户要求选择。调整精密移动台或支架，使精密辐射温度计与黑体辐射源同轴。此时辐射温度计瞄准黑体辐射源的中心位置。将被校腔式（面）辐射源温度设定在校准温度点，10 min 的温度控制稳定性不大于 0.1℃（0.15℃）或 0.1% t （0.15% t ）中的大者（ t 为校准温度点的绝对值，单位为℃）时，记录精密辐射温度计的测量值。

C.1.2 测量模型

$$T_c = \bar{T}_{cr} + \Delta T_F + \Delta T_\varepsilon \quad (\text{C.1})$$

式中：

T_c ——被校黑体辐射源的亮度温度，℃。

\bar{T}_{cr} ——被校黑体辐射源中心位置的亮度温度示值平均值，℃。

ΔT_F ——精密辐射温度计在校准温度点的亮度温度修正值，℃。

ΔT_ε ——被校黑体辐射源发射率不为 1 引入的亮度温度修正值。

C.1.3 灵敏度系数

$$C_1 = \frac{\partial T_c}{\partial \bar{T}_{cr}} = 1 \quad (\text{C.2})$$

$$C_2 = \frac{\partial T_c}{\partial \Delta T_F} = 1 \quad (\text{C.3})$$

$$C_3 = \frac{\partial T_c}{\partial \Delta T_\varepsilon} = 1 \quad (\text{C.3})$$

C.2 标准不确定度评定

C.2.1 输入量 \bar{T}_{cr} 引入的标准不确定度

- 1). 精密辐射温度计测量分辨力引入的标准不确定度 u_1 ；
- 2). 精密辐射温度计长期不稳定性引入的标准不确定度 u_2 ；
- 3). 环境温度对精密辐射温度计输出影响引入的标准不确定度 u_3 ；
- 4). 被校黑体辐射源亮度温度稳定性引入的标准不确定度 u_4 ；
- 5). 被校黑体辐射源亮度温度均匀性引入的标准不确定度 u_5 。

C. 2. 2 输入量 ΔT_F 引入的标准不确定度

精密辐射温度计示值修正值引入的不确定度 u_6 可以通过其溯源证书查询。

C. 2. 3 输入量 ΔT_ε 引入的标准不确定度

黑体辐射源发射率 ε 的不确定度引入的 ΔT_ε 的不确定度 u_7 ，可由公式 (B. 2) 或公式 (B. 3)。

以上各不确定度分量相互独立，黑体辐射源亮度温度校准的合成不确定度 u_c 由下式计算：

$$u_c = \sqrt{\sum_{i=1}^7 u_i^2} \quad (\text{C. 4})$$

C. 3 黑体辐射源亮度温度校准不确定度计算

黑体辐射源亮度温度不确定度以 1000℃ 校准点为例进行分析。

C. 3. 1 输入量 \bar{T}_{cr} 引入的标准不确定度C. 3. 1. 1 精密辐射温度计测量分辨力引入的标准不确定度 u_1

测量范围为 (-50~1000)℃ 时，精密辐射温度计测量分辨力为 0.01，为均匀分布，则不确定度 $u_1=0.005/1.732=0.003^\circ\text{C}$ ；其它测量范围，精密辐射温度计测量分辨力为 0.1，则不确定度 $u_1=0.05/1.732=0.03^\circ\text{C}$ 。

C. 3. 1. 2 精密辐射温度计长期不稳定性引入的标准不确定度 u_2

精密辐射温度计的长期稳定性引入的不确定度可以通过其溯源证书计算。查询多个周期的溯源证书，计算得到实验标准偏差为 0.21℃，则不确定度 $u_2 = 0.21^\circ\text{C}$ 。

C. 3. 1. 3 环境温度对精密辐射温度计输出影响引入的标准不确定度 u_3

本实验中，实验室环境为恒温环境，温度变化对精密辐射温度计的输出影响可以忽略。因此， $u_3 = 0^\circ\text{C}$ 。

C. 3. 1. 4 被校黑体辐射源亮度温度稳定性引入的标准不确定度 u_4

被校黑体辐射源在 1000℃ 校准点的亮度温度稳定性为 0.2℃，为均匀分布，则 $u_4 = 0.2/1.732=0.12^\circ\text{C}$ 。

C. 3. 1. 5 被校黑体辐射源亮度温度均匀性引入的标准不确定度 u_5

被校黑体辐射源在 1000℃ 校准点的亮度温度均匀性绝对值的最大值为 0.5℃，为均匀分布，则标准不确定度 $u_5=0.5/1.732=0.29^\circ\text{C}$ 。

C. 3. 2 输入量 ΔT_F 引入的标准不确定度 u_6

由精密辐射温度计的溯源证书可知, 在 1000℃校准点示值修正值的扩展不确定度为 1.6℃, 包含因子 $k=2$ 。因此, 标准不确定度 $u_6=1.6/2=0.8^\circ\text{C}$ 。

C.3.3 输入量 ΔT_ε 引入的标准不确定度 u_7

示例采用的精密辐射温度计工作波长为 1.57 μm 。被黑体发射率为 0.998~0.999 之间, 则 $u(\varepsilon) = 0.0005/1.732 = 0.00029$ 。那么根据公式 (B.3) $u_7 = 100 \times 0.00029 \times 1.81=0.052^\circ\text{C}$ 。

C.4 合成标准不确定度

黑体辐射源亮度温度校准不确定度分量如表 1 所示。

表 C.1 黑体辐射源亮度温度校准不确定度分量汇总表

输入量	不确定度来源	标准不确定度符号	标准不确定度/ $^\circ\text{C}$	灵敏度系数
T_{cr}	精密辐射温度计测量分辨力	u_1	0.03	1
	精密辐射温度计长期不稳定性	u_2	0.25	
	被校黑体辐射源亮度温度稳定性	u_4	0.12	
	被校黑体辐射源亮度温度均匀性	u_5	0.29	
ΔT_F	示值修正值不确定度	u_6	0.80	1
ΔT_ε	被校黑体辐射源发射率不确定度	u_7	0.06	1

按公式 (C.4) 计算合成标准不确定度:

$$u_c = 0.90^\circ\text{C}$$

C.5 扩展不确定度 U

取 $k=2$, 则:

$$U = k \times u_c = 1.8^\circ\text{C}$$

同样方法, 可得到其它校准点的亮度温度校准不确定度, 如表 2 所示。

表 C.2 黑体辐射源亮度校准不确定度

校准点/ $^\circ\text{C}$	扩展不确定度/ $^\circ\text{C}$	校准点/ $^\circ\text{C}$	扩展不确定度/ $^\circ\text{C}$
-50	0.8	800	1.7
-10	0.7	900	1.8
200	0.6	1000	1.8
300	1.0	1100	2.2
400	1.2	1200	2.5
500	1.3	1300	2.6
600	1.4	1400	2.7
700	1.6		