引文格式：魏保峰, 陈国平, 李宁, 等. 昆明2000平面坐标系统设计与实现[J]. 地理空间信息, 2023, 21(5): 102-106. doi:10. 3969/j.issn. 1672-4623.2023.05.025

昆明2000平面坐标系统设计与实现

魏保峰[1]，陈国平[2*]，李　宁[1]，赵文东[1]，李强军[3]
（1. 昆明市测绘研究院，云南 昆明 650051；2. 昆明理工大学 国土资源工程学院，云南 昆明 650093；
3. 云南省地矿测绘院，云南 昆明 650218）

摘　要：高原城市地形破碎、范围广、落差大，原城市相对独立平面坐标系采用的椭球参数、投影面等存在差异，已不能满足城市建设快速扩张和经济社会发展要求。设计了一种通过DEM和行政区地理位置加权来建立城市坐标系统的方法，在最大范围覆盖行政区域面积的基础上，减少了中央子午线和投影抵偿面的设置数量；并以昆明市为例进行了合理性验证。结果表明，各项指标达到规范要求，该方法对于建立类似高落差城市平面坐标系具有重要的借鉴意义。

关键词：CGCS2000；高原城市；DEM；地理位置；多投影面
中图分类号：P226　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2023）05-0102-05

Design and Implementation of Kunming 2000 Plane Coordinate System

WEI Baofeng[1], CHEN Guoping[2], LI Ning[1], ZHAO Wendong[1], LI Qiangjun[3]
(1. Kunming Surveying and Mapping Institute, Kunming 650051, China;
2. Faculty of Land Resource Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China;
3. Yunnan Surveying and Mapping Institute, Kunming 650218, China)

Abstract: The terrain of plateau city is broken, wide range and large drop, because of the ellipsoid parameters and projection plane different in the original urban relatively independent plane coordinate system, which can not meet the inevitable requirements of rapid expansion of urban construction and economic social development. We designed a method to establish urban coordinates based on DEM and weighted administrative location, which could cover the administrative area to the maximum extent and reduce the number of central meridian and projection offset planes.Taking Kunming City for example, we verified the rationality of this method.The test result shows that the indicators meet the requirements of specification. This method can be used for reference in the plane coordinate system establishment of similar high drop cities.

Key words: CGCS2000, plateau city, DEM, geographical location, multi-projection plane

通常城市或重大工程项目相对独立的平面坐标系是在国家坐标系的基础上建立的。近年来，随着社会经济的迅猛发展、城市的快速扩张以及乡村振兴战略的实施，原有的城市平面坐标系已无法满足区域发展要求[1]。2017年3月原国土资源部、国家测绘地理信息局联合发布国土资发[2017]30号《关于加快使用2000国家大地坐标系的通知》，明确2018年7月1日起全面使用2000国家大地坐标系（CGCS2000）[2-3]。随着CGCS2000的启用，很多地区提出建立本区域基于CGCS2000的城市平面坐标系[1,4]，黄堰[5]、蔡元波[6]、赵亮[7]、欧海平[8]、王建辉[9]等分别构建了达州市、宁波市、金昌市、广州市和苏州市的统一2000坐标系。昆明市于2018年启动昆明现代测绘基准体系建设工作，建立了昆明市卫星定位综合服务系统、高精度平面基本网、高程一等水准网和一等重力网等满足昆明城市建设和发展的测绘基准体系。由于历史原因，昆明城市建设有1987昆明坐标系和2004昆明坐标系两套坐标系统。为满足未来经济社会发展和城市规划建设的需要，解决现有各坐标系统不统一、不一致等问题，构建基于CGCS2000的昆明2000平面坐标系十分必要。

1　昆明市现有坐标系统概况

1.1　地形特征

昆明市地处滇东高原中部，位于102°10′~103°40′E、24°23′~26°22′N之间，东西最大横距为151 km，南北

收稿日期：2021-12-27；修回日期：2022-04-07。
项目来源：住房和城乡建设部科学项目计划资助项目（2015-R2-072、2014-R2-032）。
第一作者简介：魏保峰（1979—），硕士，高级工程师，主要研究方向为大地测量数据处理及地理信息系统工程，E-mail：27707648@qq.com。
通信作者：陈国平（1981—），博士，副教授，研究方向为GIS软件开发及数据处理，E-mail: 115432640@qq.com。

最大纵距为240 km，总面积约为21 473 km²。境内地形以高原陷落盆地与陷落河谷相交错为主，中北部高、四周低；境内河流分属金沙江、珠江、红河三大水系，形成高山大河与盆地共生、地面高差悬殊、水系复杂的地形特点。境内约85%的区域为山地，位于禄劝县境内的轿子雪山马鬃岭海拔为4 247 m；中部梁王山逶迤而下，最高海拔为2 820 m；最低海拔位于北部金沙江边，仅746 m；昆明市主城区地面海拔约为1 891 m。

1.2　现有坐标系统概况

昆明市现有1987昆明坐标系和2004昆明坐标系两套城市坐标系统，1987昆明坐标系基于1954北京坐标系椭球建立，中央子午线位于滇池西岸，主要服务于昆明市滇池盆地区域，后期在东川和石林增设了两个高程投影面；2004昆明坐标系基于1980西安坐标系椭球建立，中央子午线位于滇池东岸，建立了1条中央子午线和6个高程投影面。两套城市坐标系的主投影面均为1 800 m（正常高），低于昆明市主城区平均海拔约90 m，现有昆明坐标系虽能满足昆明主城区投影变形的要求，但随着昆明城市发展重心的东移[10-11]，东片区的部分区县已无法满足长度变形不超过25 mm/km的技术要求[12-13]。

1.3　CGCS2000投影参考椭球面长度变形分析

根据CJJ/T 8–2011《城市测量规范》要求，边长的高程归化与投影改化共同引起的总长度相对变形值应小于1/40 000或25 mm/km。边长归算主要包括：①将实测边长归算到参考椭球面上，长度缩短，其变形影响为Δs_1；②将参考椭球面上边长归算到高斯平面上，长度增加，其变形影响为Δs_2。总变形影响为：

$$\Delta s=\Delta s_1+\Delta s_2=-s\frac{H_m}{R}+\frac{1}{2}\left(\frac{y_m}{R}\right)^2 s \tag{1}$$

式中，H_m为归算边高出参考椭球面的平均高程（大地高）；y_m为归算边两端点横坐标平均值；s为边的长度；R为参考椭球面平均曲率半径。

由于昆明市距离CGCS2000的102°带东侧较远，且平均海拔较高，各县区CGCS2000投影参考椭球面长度变形量均超过了25 mm/km的技术要求（表1），直接使用CGCS2000无法满足昆明市城市工程建设的需要。因此，研究建立基于CGCS2000的相对独立平面坐标系统非常必要且十分迫切。

表1　CGCS2000投影参考椭球面长度变形量

行政区	纬度（DD.MMSS）	经度（DD.MMSS）	大地高/m	北坐标/m	东坐标/m	长度变形/(mm/km)	距子午线距离/km
五华区	25.0247	102.4222	1 880	2 771 389	571 258	–232	71
西山区	25.0228	102.3949	1 860	2 770 762	566 968	–237	67
官渡区	25.0104	102.4432	1 866	2 768 230	574 905	–224	75
盘龙区	25.0707	102.4501	1 875	2 779 415	575 681	–224	76
呈贡区	24.5303	102.4952	1 901	2 753 473	583 974	–211	84
安宁市	24.5609	102.2940	1 815	2 759 032	549 933	–254	50
晋宁区	24.4022	102.3539	1 861	2 729 948	560 148	–248	60
嵩明县	25.2029	103.0220	1 888	2 804 271	604 587	–162	105
富民县	25.1333	102.2935	1 654	2 791 170	549 691	–229	50
禄劝县	25.3332	102.2758	1 660	2 828 039	546 838	–233	47
寻甸县	25.3305	103.1521	1 839	2 827 740	626 225	–93	126
宜良县	24.5513	103.0823	1 510	2 757 690	615 126	–74	115
石林县	24.4847	103.1617	1 671	2 745 957	628 539	–59	129
东川区	26.0451	103.1107	1 250	2 886 344	618 593	–23	119

注：中央子午线为102°，参考椭球面为0.000 m。

2　昆明2000平面坐标系的设计

2.1　原则和目标

城市坐标系的建立不同于工程项目坐标系，需综合考虑原有坐标系、城镇分布、未来城乡发展规划、地形地貌等多个因素[14]。昆明2000平面坐标系设计的总体目标是为昆明可持续发展提供高精度、多功能的测绘基准保障，满足现在和未来至少30年的城市基础测绘发展需要。综合考虑上述因素，本文确定了以下原则和目标：①基于CGCS2000椭球，且可与CGCS2000实现精度无损的相互转换；②全域覆盖，兼顾重点区域发展；③最大覆盖范围满足长度变形不超过25 mm/km；④最大化地减少中央子午线、投影面高度的设置数量；⑤充分利用已有基础设施和数据，易于维护和更新，满足长期使用。

2.2 类型选择

城市坐标系是根据城市工程建设和社会发展需求而建立的，其主要特点是限制长度变形，要求实地量测边长投影长度变形应满足25 mm/km的限差[15]。通常，建立城市坐标系采用国家坐标系椭球参数，根据城市或区域中心的地理位置设定高斯投影中央子午线或以测区平均高程面为坐标投影面，通过抬高或降低高程投影面的方法解决长度变形问题[16]，有些独立坐标还需进行加常数或平移旋转变换等。根据城市坐标系建立的特点，可大致归纳为高斯投影于参考椭球面的任意带平面直角坐标系、高斯投影于抵偿投影面的任意带平面直角坐标系和以中心点坐标平移或坐标加常数和旋转的平面直角坐标系3种类型。由于昆明市域地理位置距离3°带中央子午线较远，考虑高落差和未来城市发展规模等因素，昆明2000平面坐标系一般采用高斯投影于抵偿投影面的任意带平面直角坐标系；同时为保证与CGCS2000成果的无损转换，采用椭球膨胀法模型完成CGCS2000成果向昆明2000平面坐标系的数学变换。

2.3 技术流程与参数确定

昆明2000平面坐标系建立流程如图1所示，采用CGCS2000的椭球参考，以ITRF97参考框架为基准，参考框架历元为2000.0；采用与CGCS2000椭球一致的基本参数，以“长度变形不超过25 mm/km的覆盖范围最大”为前提条件，进行长度变形试算分析，并分别以DEM和行政区所在位置为关注点，通过加权的方式寻找最佳中央子午线和投影抵偿面。

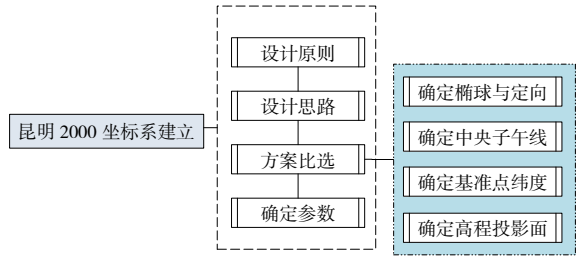


图1 昆明2000平面坐标系建立流程图

由于云南坝区土地资源非常紧缺，基于“加强坝区耕地保护、城镇上山发展”的战略背景，综合考虑城市地形地貌特点、城市未来发展格局等因素，将昆明市DEM转换成250 m×250 m格网点数据，权重设为0.4；同时采集整理昆明市乡（镇）级及以上行政区政府所在地中心地理位置数据和规划重点发展区域位置数据，权重设为0.6。采用自主开发的基于高斯正算的长度变形量计算工具进行加权计算，并对中央子午线主投影高程面覆盖情况进行统计对比（表2），可以看出，其中央子午线对于昆明市域在102°42′～102°49′之间选择主投影面最多覆盖面积的百分比差别不大，根据确定坐标系参数的原则，若选择中央子午线_投影高为102°49′_1 840 m，其主投影面远低于昆明城区以及未来城镇上山发展方向的海拔高，因此充分考虑历史和今后发展需要等因素，最终确定采用102°45′作为昆明2000平面坐标系的中央子午线、1 900 m作为主投影面即第一投影面。高斯正算公式为：

$$\begin{cases} x = X_0 + \dfrac{1}{2}Nt\cos^2 Bl^2 + \dfrac{1}{24}Nt\left(5 - t^2 + 9\eta^2 + 4\eta^4\right)\cos^4 Bl^4 + \dfrac{1}{720}Nt(61 - 58t^2 + t^4 + 270\eta^2 - 330\eta^2 t^2)\cos^6 Bl^6 \\ y = N\cos Bl + \dfrac{1}{6}N(1 - t^2 + \eta^2)\cos^3 Bl^3 + \dfrac{1}{120}N(5 - 18t^2 + t^4 + 14\eta^2 - 58\eta^2 t^2)\cos^5 Bl^5 \end{cases} \tag{2}$$

根据目前昆明市国土空间格局以及未来经济社会发展趋势，结合地形地貌等自然特点，将昆明市分为中部片区、东南部片区、北部片区3个区。在昆明市着力构建的“两核一极两区六廊”城市格局中，“两核一极两区”主要位于昆明市的中部片区，因此优先计算中部片区，获得第一投影面高度。东南部片区，地势较平坦，作为第二区块进行计算，获得第二投影面高度（1 490 m）。北部片区，以山地为主，地形破碎、落差大，因此其计算需分步实施：①确定第一、二投影面可覆盖的乡镇；②依据海拔高、中、低程度，划分、试算剩余片区，依次获得第三投影面（2 230 m）、第四投影面（1 100 m）和第五投影面（2 700 m）高度。最终构建的昆明2000平面坐标系5个高程抵偿投影面覆盖了昆明市域80%的面积、100%的乡镇及以上行政区所在地。

根据昆明市城镇建设分布情况，最终确定将昆明市中部地区中央子午线上一控制点的纬度作为昆明2000平面坐标系的基准点纬度。

确定中央子午线、高程抵偿面和平均纬度后，即可计算各投影面膨胀椭球长半轴（$a_{新}$），据此可通过CGCS2000成果直接求算昆明2000平面坐标系各投影面坐标成果。

$$a_{新} = a + \Delta a = a + \frac{1 - e^2\sin^2 B_0}{\sqrt{1 - e^2}}\Delta H \tag{3}$$

式中，a为椭球长半轴；e^2为椭球第一偏心率的平方；B_0为基准点纬度；ΔH为平均大地高。

本文根据确定的参数和DEM数据绘制抵偿投影面覆盖范围图（图2）和乡镇及以上行政区驻地投影

表2　中央子午线主投影高程面覆盖选择对比表（以加权比排序）

中央子午线_投影高	DEM			乡级以上行政区驻地地理位置			加权比
	符合点数	总格网点数	百分比/%	符合点数	行政区总数	百分比/%	
102°49′ _1 840 m	89 694	284 665	31.5	40	121	33.1	32.4
102°40′ _1 820 m	79 941	284 665	28.1	42	121	34.7	32.1
102°50′ _1 800 m	92 609	284 665	32.5	38	121	31.4	31.9
102°46′ _1 860 m	84 683	284 665	29.7	39	121	32.2	31.2
102°45′ _1 900 m	84 126	284 665	29.6	39	121	32.2	31.2
102°42′ _1 900 m	82 615	284 665	29.0	38	121	31.4	30.5
102°45′ _1 940 m	82 728	284 665	29.1	32	121	26.4	27.5
102°48′ _1 960 m	82 514	284 665	29.0	29	121	24.0	26.0
102°45′ _2 000 m	79 536	284 665	27.9	26	121	21.5	24.1
102°50′ _2 000 m	77 604	284 665	27.3	24	121	19.8	22.8

面选择图（图3）。通过图表可方便快捷地确定建设工程项目适用的昆明2000平面坐标系相关信息和数据成果。

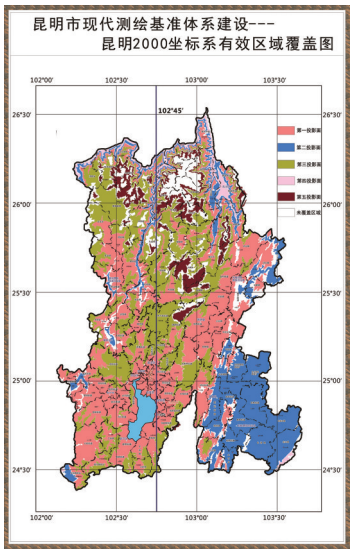


图2　昆明2000平面坐标系投影抵偿面覆盖图

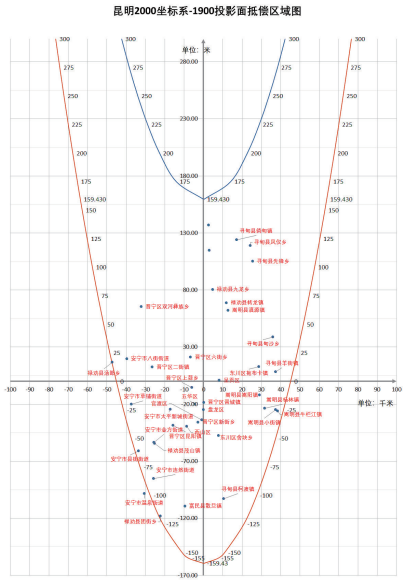


图3　昆明2000平面坐标系主投影面选择图

2.4　坐标系设计合理性验证

本文通过两种方式验证坐标系各投影面设计的合理性。

1）利用平面联测的控制点（GNSS点63个、CORS站21个、陆态网点8个）对5个投影面的设计合理性进行检核。从中提取市域范围内77个点作为检核，结果表明，67个点的长度变形情况与DEM格网数据分析结果基本一致，10个点在各投影面中的长度变形超限，这些点均位于山顶处，从而验证了本次设计所使用DEM格网数据是可靠的（图4）。

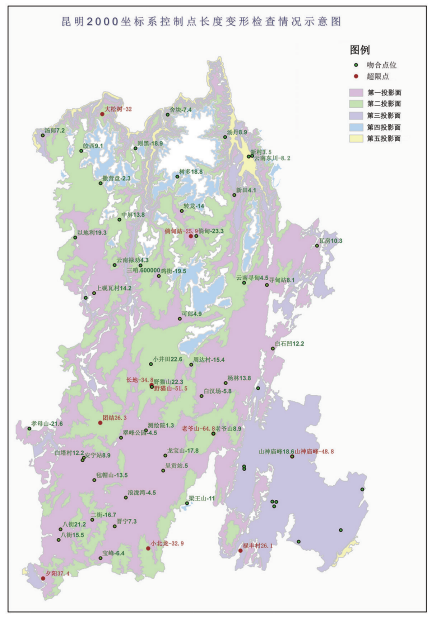


图4　控制点长度变形检验图

2）针对5个投影面，从每个投影面选取两条长度约为2 km的边进行电磁波实地测距，并与GNSS测量的坐标边长进行对比，结果如表3所示，可以看出，昆明2000平面坐标系每km变形量理论值和实地测边的对比结果均达到国家相关规范精度要求（长度变形不超过25 mm/km），表明该平面坐标系设计、计算的

表3 昆明2000坐标系测边检验对比表

点号	实测边/m	坐标边/m	较差/m	理论变化量/(mm/km)	实测变化量/(mm/km)	所在投影面高程/m	所属高程面
CRXL–TFJD	2 364.088	2 364.087	–0.001	2	0	1 900	第一高程面
DYJD–LJBC	2 249.396	2 249.411	0.015	6	7	1 900	
DC–YNC	1 967.882	1 967.896	0.015	19	8	1 100	第四高程面
YNC–XLT	1 736.318	1 736.333	0.016	13	9	1 100	
LMXQ–DLTJ	1 934.295	1 934.302	0.008	7	4	1 490	第二高程面
DLTJ–LDS	1 703.833	1 703.829	–0.003	6	–2	1 490	
SYP–JC	2 162.721	2 162.703	–0.018	1	–8	2 230	第三高程面
JC–SYS	2 641.732	2 641.708	–0.023	–6	–9	2 230	
SLS–SC	1 534.887	1 534.872	–0.015	–1	–10	2 700	第五高程面
SC–MLT	1 643.97	1 643.954	–0.016	–8	–10	2 700	

各投影面是合理的，已批准发布使用。。

2.5 地方坐标系成果计算

根据设计结果中确定的最终各项参数和理论模型，编写相应的框架网和基本网起算数据计算工具，即可计算得到昆明2000平面坐标系各抵偿投影面的起算数据。特别需要注意的是，采用不同的椭球膨胀法来求取，因其长半轴不同，将导致最终的绝对坐标有所差异。

3 结 语

通过DEM和地理位置加权综合确定椭球参数，可有效解决高落差城市坐标系中中央子午线以及投影抵偿面选择不合理等问题。本文设计了一种基于DEM和行政区地理位置联合加权构建昆明2000平面坐标系的方法，并开发了投影长度变形量计算软件，能实现中央子午线和投影高程面的批量自动计算和统计，快速准确得到最优的中央子午线和投影高程面。经验证，设计方法科学合理，达到长度变形不超过25 mm/km的规范精度要求。系统设置了5个投影面，其中第一投影面（主投影面）高程为1 900 m，其他4个投影面高程分别为1 490 m、2 230 m、1 100 m和2 700 m，可满足昆明市未来至少30年城市发展格局和社会经济发展的需要，对于类似高原城市、高落差区域城市独立平面坐标系的构建具有一定的借鉴意义。由于历史等原因，很多城市存在多种相对独立的坐标体系和多源数据成果，如何实现现有坐标系和成果向新建坐标系的批量、快速、无损转换，使得过渡期内新旧坐标系成果能顺利无缝衔接，设计科学的转换模型、研发批处理转换软件是下一步研究的重点和方向。

参考文献

[1] 李晓华,安艳辉. 基于DEM的CGCS2000城市平面坐标系建立关键技术研究[J]. 测绘地理信息,2020,45(5):150-152

[2] 秦亮军,余锐. 2000独立坐标系参数反演算法研究及应用[J]. 工程勘察,2019,47(4):40-44

[3] 岳颖,高付才,赵鑫,等. CGCS2000与城市坐标系转换方法的比较[J]. 地理空间信息,2019,17(12):82-84

[4] 陈俊勇. 中国现代大地基准:中国大地坐标系统2000(CGCS2000)及其框架[J]. 测绘学报,2008,37(3):269-271

[5] 黄堰. 基于CGCS2000的达州市独立坐标系建立[J]. 全球定位系统,2014,39(3):90-92

[6] 蔡元波,何春莲. 宁波市2000坐标系建立及推广应用研究[J]. 城市勘测,2014(2):119-121

[7] 赵亮,吉长东,徐爱功. 金昌城市独立坐标系与2000国家大地坐标系转换研究[J]. 矿山测量,2017,45(5):71-75

[8] 欧海平,秦亮军,喻永平,等. 广州2000坐标系建立技术及应用[J]. 工程勘察,2018,46(11):55-58

[9] 王建辉,史纲,杨胜万,等. 苏州2000坐标系建立方案比选与研究[J]. 城市勘测,2020(4):5-11

[10] 陈国平,赵俊三,李红波,等. 滇中城市群耕地时空变化分析方法[J]. 昆明理工大学学报(自然科学版),2016,41(2):24-32

[11] 陈国平,赵俊三,李红波,等. 滇中城市群土地利用空间结构差异性分析[J]. 河南理工大学学报(自然科学版),2017,36(2):68-74

[12] 城市坐标系统建设规范:GB/T 28584-2012[S]. 北京:中国标准出版社,2012

[13] 住房和城乡建设部关于发布行业标准《城市测量规范》的公告[J]. 北京勘察设计讯息,2011(12):9-10

[14] 李东,毛之琳,王文利,等. CGCS2000独立坐标系与原城市独立坐标系融合问题的研究[J]. 测绘通报,2014(6):17-19

[15] 雷伟伟,姜斌. 国家坐标系与城市坐标系转换方法的探讨[J]. 测绘科学,2010,35(1):22-23

[16] 阳海峰. 2000国家大地坐标系与我国常用坐标系在大地控制成果转换方面的研究[D]. 西安:西安科技大学,2010:13-17